

Материалы XXV Совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока



ПОДЗЕМНАЯ ГИДРОСФЕРА

Иркутск

2026

Российская академия наук
Сибирское отделение
Институт земной коры
Международная ассоциация гидрогеологов

ПОДЗЕМНАЯ ГИДРОСФЕРА
МАТЕРИАЛЫ
МЕЖДУНАРОДНОГО СОВЕЩАНИЯ
ПО ПОДЗЕМНЫМ ВОДАМ ВОСТОКА РОССИИ

(XXV Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока)

Иркутск
2026

Подземная гидросфера: Материалы XXV Международного совещания по подземным водам востока России. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2026. – 433 с.

В сборнике представлены доклады XXV совещания по подземным водам востока России, посвященного 100-летию со дня рождения и светлой памяти организатора, выдающегося ученого – главы школы сибирских гидрогеологов, члена-корреспондента РАН, профессора Евгения Викторовича Пиннекера (1926–2001). В нем отражены важнейшие результаты работ теоретических и прикладных исследований, выполненных научными, вузовскими и производственными коллективами в области гидрогеологии.

Материалы совещания представляют интерес для специалистов-геологов широкого профиля, теоретиков и практиков, а также для аспирантов и студентов.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.г.-м.н. Л.П. Алексеева (ответственный редактор)
д.г.-м.н. Л.А. Абукова
к.г.-м.н. Л.И. Аузина
к.г.-м.н. П.С. Бадминов
д.г.-м.н. С.В. Борзенко
д.г.-м.н. А.Г. Вахромеев
к.г.-м.н. А.Г. Верхотуров
д.г.-м.н. В.Е. Глотов
д.г.-м.н. Н.В. Гусева
к.г.-м.н. Л.В. Замана
д.т.н. Е.В. Зелинская
д.г.-м.н. А.В. Кирюхин
к.г.-м.н. А.М. Кононов
д.г.-м.н. Г.Н. Копылова
д.г.-м.н. О.Е. Лепокурова
к.г.-м.н. Н.Г. Максимович
д.г.-м.н. Д.А. Новиков
к.г.-м.н. А.Ю. Озёрский

к.г.-м.н. А.И. Оргильянов
к.г.-м.н. С.Х. Павлов
к.г.-м.н. Н.А. Павлова
к.г.-м.н. В.А. Пеллинен
д.г.-м.н. А.Г. Плавник
д.г.-м.н. А.М. Плюснин
д.г.-м.н. С.П. Поздняков
к.г.-м.н. В.А. Потурай
чл.-корр. РАН В.Г. Румынин
д.г.-м.н. Л.С. Рыбникова
к.г.-м.н. А.А. Светлаков
д.г.-м.н. С.Н. Тагильцев
д.г.-м.н. И.А. Тарасенко
к.г.-м.н. М.А. Тугарина
д.г.-м.н. Н.А. Харитонов
д.г.-м.н. А.П. Хаустов
д.г.-м.н. В.В. Шепелёв

Особая благодарность нашему спонсору – Санкт-Петербургскому отделению института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (в лице директора института к.г.-м.н. **А.М. Никуленкова** и научного руководителя чл.-корр. РАН **В.Г. Румынина**), финансовая поддержка которого обеспечила своевременную публикацию этого сборника.

Спонсорскую помощь в организации и проведении совещания оказали: чл.-корр. РАН **М.Н. Железняк** (ИМЗ СО РАН, Якутск); д.т.н. **М.В. Корняков** (ИРНИТУ, Иркутск); коллектив лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН (Якутск); к.г.-м.н. **В.А. Потурай** (ИКАРП ДВО РАН, Биробиджан); д.г.-м.н. **Л.С. Рыбникова**, к.г.-м.н. **Рыбников П.А.** (ИГД УрО РАН, Екатеринбург); **А.Ю. Каплан**, д.г.-м.н. **А.Л. Язвин** (АО "ГИДЭК", Москва); **В.В. Тихонов** (Архитектурно-этнографический музей «Тальцы»); **А.Б. Купчинский** (Байкальский музей, Листвянка); **Т.М. Гаджиев** (BAIKALSEA, Иркутск).

ПРЕДИСЛОВИЕ

ЕВГЕНИЙ ВИКТОРОВИЧ ПИННЕКЕР к 100-летию со дня рождения



В июне 2026 г. научная общественность отмечает 100-летие со дня рождения выдающегося ученого с мировым признанием главы сибирской гидрогеологической школы лауреата Государственной премии СССР и премии Совета Министров СССР члена-корреспондента РАН **Евгения Викторовича Пиннекера**.

С именем Е.В. Пиннекера связано определение гидрогеологии как науки о подземной гидросфере, учения обо всех разновидностях воды земных недр. Сформулированные им научные положения позволили разработать стратегические принципы и методологию теоретической и прикладной гидрогеологии. Е.В. Пиннекер – автор новейшей классификации подземных вод и процессов, формирующих их состав, является одним из пионеров использования изотопных данных для обоснования генезиса подземных вод. Ему принадлежит разработка проблем, касающихся роли воды в геологических процессах, а также экологических аспектов гидрогеологии как составной части охраны окружающей природной среды. Под его руководством открыты и освоены многие месторождения подземных вод Восточной Сибири.

Этой незаурядной личности и его разносторонней деятельности посвящена книга «Евгений Викторович Пиннекер», изданная в 2006 г. в серии «Наука Сибири в лицах». В нее включено более трех десятков очерков-воспоминаний родных, друзей, коллег, которые близко знали Е.В. Пиннекера и высоко ценили его научный талант и личные качества.

Одно из последних интервью известного ученого, которое взяла у него мастер научной журналистики Галина Киселева, было опубликовано в сетевом издании «Глагол. Иркутское обозрение» 14 ноября 2018 г. В нем Е.В. Пиннекер раскрылся как человек остро переживающий за свою науку и землю, глубоко преданный своему делу и заботящийся о будущем своего дома, страны. Интервью печатается полностью.

«Евгений Пиннекер: Жемчуг мог стать вторым Баден-Баденом»

Галина Киселева: На одной из международных конференций прозвучало утверждение, что Сибирь гораздо богаче минеральными источниками, чем Кавказ. Так ли это?

Евгений Пиннекер: Раньше считалось, что лучшие минеральные источники находятся на Кавказе и в Центральной Европе. Знаменитые курорты Баден-Баден, Карловы Вары, куда любила ездить наша дворянская знать и где проводил много времени Ф. Достоевский. Позднее многие известные курорты стали утрачивать свое значение, поскольку открывались все новые и новые месторождения целебных вод. Мы, изучив Восточную Сибирь, доказали, что ее недра аналогичны или, точнее, обладают более разнообразными минеральными водами, чем какие-либо другие регионы. Здесь есть все виды вод, и по составу они даже богаче знаменитых Мацесты, Трускавца и т.д. Есть месторождения, в которых целый комплекс различных целебных вод. Вообще, подземные рассолы Сибири содержат солей до 600 г на литр (то есть солей больше растворителя). Уникальный состав. Это настоящий феномен. Для сравнения — минерализация Мирового океана составляет лишь 35 г на литр. Есть в Восточной Сибири термальные, углекислые и радоновые воды.

Г.К.: Все ли воды полезны?

Е.П.: Подземные воды могут играть и коварную роль. Насыщенные солями растворы разрушают фундаменты зданий, основания мостов. На Севере, например, в зоне вечной мерзлоты, где их называют криопэгами, борьба с влиянием подземных рассолов – серьезная проблема. Особенно много забот доставляют минерализованные воды алмазодобытчикам. Они заполняют карьеры кимберлитовых трубок, осложняют работу техники.

В сущности, подземные рассолы – это своеобразная жидкая руда. Особенно много в них лития (а это ракетное топливо), брома (а это присадка к бензину), соли, наконец. Кстати, это первый продукт, который стали извлекать промышленным путем из подземных вод еще казаки. И сегодня мы пользуемся поваренной солью, которая добыта из подземных рассолов. Получают из них и другие продукты, но в целом промышленное значение "жидкой руды" в качестве полезного ископаемого еще мало изучено, и используется она далеко не в полную меру.

Г.К.: Как применяются целебные воды?

Е.П.: Сегодня во многих местах разливают минеральные воды – широко известны воды "Иркутская", "Братская", "Ангарская", "Мальтинская", "Жемчужина Байкала". Соленые воды тоже применяют как лечебные, но очень редко, термальные и углекислые эффективнее. Целебных источников в Сибири очень много. Особенно ценны термальные воды, температура которых от 35 до 80 градусов. Их используют в основном для лечебных ванн. А можно было бы более широко применять для обогрева, например, теплиц, жилых помещений.

До 50-х годов в районе Иркутска не было известно ни одного источника лечебной воды. Первый был найден при бурении скважины на нефть в Разводной (сейчас он на дне водохранилища). Позже пробурили две скважины в Иркутске, в районе курорта "Ангара". Сейчас открыто около полутора десятков различных проявлений. Мы их не только тщательно изучили, нанесли на карты, но активно участвовали в освоении. Делали анализы, проводили экспертизы. Раньше ни один источник без наших рекомендаций не осваивался. Используются источники, конечно же, плохо. Есть в Иркутской области курорты "Усть-Кут", "Ангара", "Усолъе-Сибирское", но они недостаточно благоустроены, да и в нынешних условиях дорог. В основном в Сибири превалирует дикий способ лечения. Ставят палатку в тайге и принимают ванны, пьют воду сколько душе угодно, без всякого врачебного наблюдения.

Г.К.: Какие целебные источники наиболее популярны у сибиряков и, на ваш взгляд, действительно заслуживают внимания?

Е.П.: Прежде всего курорт "Ангара" с его рассолом, "Сибирской Мацестой" называют Новонукутское месторождение высокосероводородных рассолов. Состав их даже насыщеннее, чем в знаменитой Мацесте. В усть-кутских водах мы обнаружили радон, что позволило расширить сферу их лечебного воздействия. Нашими специалистами открыта и изучена вода на реке Киренга. Это Мунокский источник, где вода типа трусковецкой

"Нафтуси". Там каждое лето бывает около тысячи человек. Большое содержание в этих пресных водах органических веществ нефтяного ряда делает их лечебные свойства особенно эффективными. Популярны у населения углекислые термальные воды Восточного Саяна: Уш-Бельдир, Чойган, Шумак. В Тункинской долине – Жемчуг, Нилова Пустынь и Аршан. Издавна используются источники Турукский и Паршинский ("Вонькие ключи"), Туманшетский источник, Ключевской по реке Киренге и многие другие. Эти источники содержат соленые, хлоридные натриевые воды. Привлекают людей лечебные свойства соленых сульфатных натриевых вод Узколожского и Наймодаевского источников.

Г.К.: Кто открывал и изучал источники?

Е.П.: Выходы таких вод давно были известны. С приходом русских поселенцев у соленых источников стали создаваться солеварни – так появились названия Усолье, Солянка, Усолка. Усть-Кутский солеваренный завод, например, был основан землепроходцем Хабаровым в 1639 году. Первый курорт в Иркутской области возник в 1848 году в Усолье-Сибирском. Рассольные источники описывали известные ученые Гмелин, Паллас, Обручев. Именно Обручев предсказал, что Восточно-Сибирская соляная провинция станет крупнейшей в мире.

Наша задача заключалась в том, чтобы обобщить все сведения, тщательно изучить территорию Сибирской платформы и Восточной Сибири в целом, провести химические исследования, систематизировать все эти знания в картах, теоретических обобщениях. Даже новое понятие ввели. Раньше считалось, что гидрогеология – наука о подземных водах. Мы доказали, что это наука о воде земных недр, ведь вода здесь может быть в виде льда, в виде пара, и в физически или химически связанном состоянии, например в гипсе, который содержит две молекулы воды, и вода при высокой температуре выделяется при переходе его в другое состояние – в минерал ангидрит.

Первые систематические исследования минеральных вод Сибири проводила Валентина Георгиевна Ткачук. Под ее руководством написана книга "Минеральные воды южной части Сибири". Я в то время был еще молодым сотрудником и помогал ей, описывая воды курорта "Усолье". Позднее довелось исколесить всю Сибирь, изучая самые различные проявления подземных вод. Многие источники были открыты до нас, но их нужно было описать, изучить. Были и такие, которые открыли мы сами. Например, воду типа трускавецкой около Киренска. Сделали первый анализ, определили, что радона нет, газа специального нет, вода пресная, нетермальная. В чем же ее целебная сила? Выяснили, что в ней есть органические вещества нефтяного ряда. Провели совместно с медиками все необходимые исследования и доказали высокие целебные свойства этих вод. Они лечат от болезней желудочно-желудочного тракта, особенно мочекаменную болезнь. Подобным же образом открыли три других источника. Например, у Новонукутска обнаружили воду типа сочинской "Мацесты", но сероводорода в ней столько, что обычными методами ее исследовать было нельзя. Разработали свою методику. Определили, что она содержит его 250 мг на литр, а в Мацесте – 150! Сразу пробурили скважины и поставили вопрос об организации курорта. В середине девяностых мой коллега Ю. Кустов у деревни Натка изучал воду с высоким содержанием кремниескислоты.

Г.К.: А вас отметили как первооткрывателей?

Е.П.: К сожалению, нет. Государственные премии были – за издание книг, за изучение гидрогеологии БАМа. У меня есть три премии первооткрывателя, но присуждены они за разведку угольных месторождений. По минеральным источникам мы не раз подавали заявки на открытие, но курортологические ведомства имеют свой взгляд на этот вопрос.

Г.К.: Каким бы вы хотели видеть будущее целебных вод?

Е.П.: Сибирь могла бы прославиться своими курортами – тот же Жемчуг мог стать вторым Баден-Баденом. Термальные воды можно было бы использовать с огромным эффектом, как это делают во многих странах, самые различные полезные ископаемые добывать из подземных вод. Но... Может быть, пока "дикий способ" использования целебной

силы здешних минеральных вод и имеет свои преимущества. Он доступен каждому – из года в год на источниках поправляют здоровье тысячи сибиряков.

Г.К.: Не в этом ли, да еще в уникальной байкальской воде, истоки знаменитого "сибирского здоровья"?

Е.П.: А байкальская вода не столь уж и полезна для жителей Прибайкалья и Приангарья. В ней очень мало фтора и йода. Еще в 50-х годах врачи поднимали вопрос о необходимости йодирования продуктов, например, соли. Фтор добавляют в хлеб, молоко. Это очень серьезная тема для разговора...

Е.В. Пиннекер был выдающимся представителем отечественной науки – гидрогеологии и своим неутомимым трудом сделал очень многое для ее развития и процветания. Образ Евгения Викторовича – лидера российских гидрогеологов – навеки сохранится в сердцах современников и будущих поколений.

Знаменательному событию – юбилею Евгения Викторовича Пиннекера – посвящено очередное XXV совещание по подземным водам востока России, которое пройдет в Иркутске и в пос. Листвянка (на Байкале). Участники обсудят широкий спектр проблем, стоящих перед отечественной и мировой наукой, а также прорывные технологии поиска, разведки, использования и переработки подземных вод.

Совещание будет проходить под флагом десятилетия науки и технологий (2022–2031 гг.), включающего в себя комплекс инициатив, проектов и мероприятий для усиления роли науки и технологий в решении важнейших задач развития общества и России в целом, а также в рамках международного десятилетия действий «Вода для устойчивого развития» (2018–2028 гг.).

В настоящем сборнике содержится 114 докладов, отобранных редколлегией для публикации. Они охватывают широкий круг теоретических и прикладных проблем гидрогеологии, инженерной геологии и геокриологии. География участников совещания существенно расширилась, и теперь наряду с материалами по Сибири и Дальнему Востоку мы публикуем результаты гидрогеологических исследований в европейской части РФ (Крыму, Прикаспийской впадине, Татарстане, Карелии), Казахстане, Киргизии, Польше, Китае и Турции. Всероссийское совещание по подземным водам востока России приобрело истинно международный статус. И это лучшее свидетельство того, что идеи и начинания Евгения Викторовича Пиннекера не умирают, а получают дальнейшее развитие.

*Доктор геол.-мин. наук С.В. Алексеев,
доктор геол.-мин. наук Л.П. Алексеева*

I. ГИДРОГЕОЛОГИЯ В XXI ВЕКЕ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

ГЕОФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГЛУБОКОПОГРУЖЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СИСТЕМ В ПРЕДЕЛАХ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ БАССЕЙНОВ (В КОНТЕКСТЕ НАУЧНЫХ ПОЗИЦИЙ Е.В. ПИННЕКЕРА)

Абукова Л.А.¹, Селиверстова М.Е.¹, Абдрашитова Р.Н.²

¹Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, abukova@ipng.ru

²Тюменский индустриальный университет, Тюмень, abdrashitovarn@tyuiu.ru

Аннотация. Цель исследования состоит в обосновании механизмов формирования углеводородных систем в нижних геофлюидодинамических этажах осадочных бассейнов для установления значимых различий в углеводородных системах на малых и больших глубинах осадочных чехлов Земли. Развивая идеи Е.В. Пиннекера о пассивности гидродинамических режимов на больших глубинах осадочного чехла, авторы прогнозируют развитие в низах земной коры стагнационного водонапорного режима, контролирующего образование углеводородных систем автоклавного типа *in-situ*.

Ключевые слова: геофлюидодинамика, большие глубины, земная кора, нефтегазоносность

Abstract: The aim of the study is to substantiate the mechanisms of formation of hydrocarbon systems within the lower geofluid dynamic floors of sedimentary covers of ancient sedimentary basins- to establish significant differences in the hydrocarbon systems at shallow and great depths of the Earth's sedimentary covers. Developing the ideas of E.V. Pinneker about the passivity of hydrodynamic regimes at great depths of the sedimentary cover, the authors predict the development of a stagnant water pressure regime in the lower crust, which determines the formation of autoclave-type hydrocarbon systems by *in-situ*.

Keywords: geofluid dynamics, great depths, Earth's crust, oil and gas potential

Выдающийся советский (российский) гидрогеолог Е.В. Пиннекер обосновал концепцию подземной гидросферы как основного объекта изучения современной гидрогеологии. Предложенный им научный подход имеет фундаментальное значение для решения задач в области гидрогеологического прогнозирования горючих и рудных полезных ископаемых в литосфере. Концепция базируется на идее взаимосвязи разномасштабных гидрогеологических структур и процессов, оказывающих влияние на другие планетарные оболочки гидросферы, а также на органоминеральную матрицу водовмещающей среды и содержащиеся в ней жидкие и газовые компоненты [5, 8].

Столь важные проблемы, как (1) воссоздание кинетики физико-химических преобразований многокомпонентной совокупности подземных вод под воздействием геофизических, геодинамических и термобарических факторов в геологическом масштабе времени, (2) использование диагностических возможностей подземных вод для уточнения масштабов процессов нефтидогенеза и рудогенеза, являются лишь частью спектра теоретических аспектов в области гидрогеологии XXI в. [8].

Цель исследования состоит в обосновании механизмов формирования углеводородных систем в нижних геофлюидодинамических этажах осадочных бассейнов для установления значимых различий в механизмах генерации и аккумуляции углеводородов на малых и больших глубинах осадочного чехла Земли. Особое внимание уделяется теоретическим положениям, разработанным Е.В. Пиннекером относительно гидродинамических обстановок земной коры. В частности, рассматриваются такие аспекты, как развитие в низах осадочного чехла пассивного водонапорного режима, сложных взаимосвязей между зонами питания, стока и разгрузки подземных вод [1].

В соответствии с теоретическими воззрениями Е.В. Пиннекера пластовые воды, жидкие и газообразные углеводороды (УВ) должны рассматриваться как взаимосвязанные и взаимозависимые компоненты единой геофлюидной системы Земли. На этом основании авторы считают, что корректно выделять в осадочных бассейнах геофлюидодинамические

этажи (ГФЭ) как часть геологического пространства, где воды, жидкие и газообразные УВ связаны единством условий образования и функционирования. В пределах нефтегазоносных бассейнов, как правило, обособляются два (или более) ГФЭ, разделенные эффективными региональными флюидоупорными толщами. Последние являются наиболее значимыми элементами геофлюидодинамической специализации осадочного чехла, что имеет большое значение для изучения нефтегазоносности.

В верхнем ГФЭ воды движутся от областей питания (с высоким гипсометрическим положением) к зонам разгрузки (с низкими гипсометрическими отметками), в том же направлении протекает миграция УВ совместно с подземными водами [4]. В верхних ГФЭ могут образовываться и элизионные водонапорные системы, однако они имеют подчиненное значение. Эти механизмы детально рассмотрены в научной и учебной геологической литературе [7].

Гидродинамические условия в нижних ГФЭ зависят от общей мощности осадочного чехла, а также от качества (проницаемости и мощности) флюидоупоров. Среди последних выделяется такой тип слабопроницаемых толщ, который обеспечивает наиболее высокую степень изоляции нижнего этажа. Ими могут быть галогенно-сульфатные отложения, магматические, конденсированные глинисто-кремнистые отложения абиссальных равнин, сланцевые гиганты (баженовская, доманиковская и другие сланцевосные формации). Такие флюидоупоры мы предлагаем называть доминантными [4]. Яркий образец доминантного флюидоупора России – соленосная толща пермского возраста в Прикаспийском бассейне.

В нижних ГФЭ, как правило, скорости вод, генетически связанных с постэлизионными процессами, минимизированы, природа барогенерации компрессионная, сохранность зон аккумуляции УВ достаточно высокая, поскольку очаги нефтегазообразования и зоны нефтегазонакопления сближены, а роль вторичной миграции крайне незначительна [3, 9]. В предельном случае (при полной гидродинамической, геолого-тектонической и литологической изоляции) на определенный период геологической истории формируется гидродинамическая стагнация, выраженная регионально и вертикально. В нашем понимании, режим гидродинамической стагнации проявляется на глубинах ниже, чем пассивный гидродинамический режим, определенный Е.В. Пиннекером для условий Восточной Сибири порядка 2-3 км. Более того, для проявления стагнационного режима необходимо тектоническое и литологическое ограничение геологической среды. Как следствие, углеводородные системы (УВС) функционируют в этих условиях по принципу *in-situ*, т.е. становятся автоклавными [4]. Ранее для УВС, образованных в подобных термобарических условиях, А.А. Трофимук предложил термин котел-реактор [2].

Отметим важное: автоклавные УВС с физической точки зрения характеризуются двойственностью свойств – в термодинамическом отношении представляют собой открытые системы, но в гидродинамическом плане они закрытые. Вследствие этого при отсутствии притока извне и оттока флюидов во внешнюю среду на протяжении длительной геологической истории (исключая периоды тектонических инверсий) в закрытых УВС возникают условия для геохимического взаимодействия флюидов, пород, органических веществ, содержащихся в породах. Внешние энергетические воздействия в виде термобарических и геофизических нагрузок, несомненно, оказывают свое влияние на процесс трансформации органического вещества в УВ, а также на локализацию фазобособленных УВ как в самой нефтегазоматеринской толще, так и в смежных резервуарах [6, 10].

Данные, ниже сведенные в таблицу, обобщают авторские представления о влиянии геофлюидодинамических особенностей на нефтегазообразование и нефтегазонакопление в различных этажах осадочных нефтегазоносных бассейнов и на различных глубинах их проявления.

Характеристика геофлюидодинамических этажей
и соответствующих типов углеводородных систем

Геофлюидодинамические этажи			Углеводородные системы	
Типы этажей	Водонапорные режимы (а) и их физическая основа (б)	Параметры	Тип УВС	Формула онтогенеза. Основная глубина проявления
Верхний	(а) свободный и затрудненный (б) гравитационный	а) зональное распространение; б) затрудненный водообмен; в) преимущественно латеральная миграция; г) характер распространения; пластовый; д) особенности барогенерации: пластовое давление в большинстве случаев равно гидростатическому;	Проточный открытый	генерация ⇒ эмиграция ⇒ вторичная (преимущественно латеральная) миграция ⇒ аккумуляция ⇒ эволюция ⇒ разрушение глубина до 1–2 км и ниже
	Регионально выдержанный флюидоупор			
	(а) весьма затрудненный (б) компрессионная	а) региональное распространение; б) весьма затрудненный водообмен; в) преимущественно вертикальная миграция; г) характер распространения; очаговый; д) особенности барогенерации: пластовое давление различно и зависит от литостатических нагрузок;	Проточный квазиоткрытый	генерация ⇒ эмиграция ⇒ вторичная ⇒ преимущественно вертикальная) миграция ⇒ аккумуляция ⇒ эволюция ⇒ ремиграция глубина от 2–5 км и ниже
Доминантный флюидоупор (преимущественно соленосные, сланценозные, долеритовые покровы)				
Нижний	(а) весьма затрудненный и пассивный (стагнационный) (б) компрессионная	а) региональное распространение; б) отсутствие водообмена с внешней средой; в) массоперенос внутри резервуара; г) возможна вертикальная миграция в периоды восходящих тектонических движений; д) особенности барогенерации: пластовое давление с внутренней границы резервуара равно поровому во внешней среде;	Автоклавный очаговый (квази)закрытый	генерация ⇒ эмиграция ⇒ аккумуляция ⇒ эволюция ⇒ консервация глубина от 5–15 км и ниже
		а) зональное распространение; б) отсутствие водообмена с внешней средой; в) массоперенос внутри резервуара по трещинному пространству; в) преимущественно вертикальная миграция в периоды восходящих тектонических движений; г) особенности барогенерации: пластовое давление с внутренней границы резервуара равно поровому во внешней среде.	Автоклавный блочный (квази)закрытый	эмиграция ⇒ аккумуляция ⇒ эволюция ⇒ консервация глубина от 5–15 км и ниже

В завершение затронем еще один аспект исследования. Проведенное сопоставление условий генерации и аккумуляции УВ в верхних и нижних ГФЭ осадочного чехла позволяет предложить уточнение термина «большие глубины нефтегазоносных бассейнов». Под этим термином предлагается понимать геологическую среду ГФЭ, то есть область, ограниченную кровлей доминантного флюидоупора.

Такой подход позволит преодолеть неопределенность понятия «большие глубины», которое в настоящее время используется в нефтегазовой геологии в достаточно «размытом» смысле. Предлагаемая интерпретация придает данному термину четкую геологическую и физическую сущность, что является важным шагом в развитии теоретических основ прогнозирования нефтегазоносности.

Для каждого нефтегазоносного бассейна применение предложенного подхода позволит конкретизировать механизмы формирования зон нефтегазонакопления на различной глубине. Это, в свою очередь, создаст основу для более эффективного освоения углеводородных ресурсов, включая комплексы, которые ранее не были охвачены бурением.

Список литературы

1. Абукова Л.А. Геофлюидодинамика глубокопогруженных зон нефтегазонакопления // Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности. М. 2002. С. 78–85.
2. Волож Ю.А., Абукова Л.А., Рыбальченко В.В., Меркулов О.И. Формирование месторождений нефти и газа в глубокопогруженных углеводородных системах: на пути к универсальной поисковой концепции // Геотектоника. 2022. № 5. С. 27–49.
3. Пиннекер Е.В. Законы развития и методология изучения подземной гидросферы // Водные ресурсы. 1987. № 2. С. 18.
4. Пиннекер Е.В. Подземная гидросфера. Новосибирск: Наука, 1984. 163 с.
5. Пиннекер Е.В. Проблема региональной гидрогеологии. Закономерности распространения и формирования подземных вод. М.: Наука. 1977. 196 с.
6. Трофимук А.А. Проблемы развития газодобывающей промышленности СССР // Теоретические и региональные проблемы геологии нефти и газа. Новосибирск: Наука, 1991, С. 6–14.
7. Li Weia, Yu Ziliangb, Wang Xuekea, Yu Zhichaoa, Lu Xuesonga, Feng Qingfua, Formation mechanisms of deep and ultra-deep over pressure caprocks and their relationships with super-large gas fields in the petroliferous basins of China // Natural Gas Industry. 2020. Vol. 17, No. 5. P. 443–452.
8. Tóth J. Gravitational systems of groundwater flow: theory, evaluation, utilization. – Cambridge Univ. Press., Cambridge. UK. 2009. P. 311.
9. Pang X. Q., Jia C. Z., Wang W. Y. Petroleum geology features and research developments of hydrocarbon accumulation in deep petroliferous basins // Petroleum Science. 2015. T. 12. №. 1. С. 1–53.
10. Wendebourg, Johannes, Jean-Jacques Biteau, and Yves Grosjean. «Hydrodynamics and hydrocarbon trapping: Concepts, pitfalls and insights from case studies» // Marine and Petroleum Geology, 2018. 96. P. 190–201.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА РАССОЛОВ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ СХОДИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Алексеева Л.П., Алексеев С.В., Дурбан Л.А.

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, laalex@crust.irk.ru

Аннотация. Оценка сходимости результатов определения некоторых компонентов химического состава рассолов (Li, Rb, Sr, Ca) выполнена после определений содержания этих элементов различными методами – титриметрическим, атомно-абсорбционным и масс-спектрометрическим с индуктивно – связанной плазмой. Даны рекомендации по определению макро- и микрокомпонентов в таком сложном объекте исследования, как подземные рассолы.

Ключевые слова: рассолы, химический состав, атомно-абсорбционный метод, масс-спектрометрия, традиционные методы

Abstract. An assessment of the convergence of the results for determining certain components of the chemical composition of brines (Li, Rb, Sr, Ca) was performed after determining the contents of these elements using various methods — titrimetry, atomic absorption, and inductively coupled plasma mass spectrometry. Recommendations are provided for determining macro- and microcomponents in such a complex object as ground brines.

Keywords: ground brines, chemical composition, atomic absorption method, mass spectrometry, traditional methods

Количественный анализ химического состава растворов может выполняться различными методами – традиционными аналитическими [1] либо инструментальными (например, атомно-абсорбционным [2] или масс-спектрометрией с индуктивно – связанной плазмой).

Определение с помощью метода масс-спектрометрии с индуктивно – связанной плазмой – это анализ содержания элементов в растворе, в отличие от традиционных методов химического анализа, в ходе которого устанавливается ионно-солевой состав воды, причем в зависимости от ее плотности. Это особенно важно для высококонцентрированных растворов (рассолов), плотность которых существенно выше плотности пресной воды (1 г/см^3). В связи с этим была поставлена цель – оценить сходимость результатов определения микрокомпонентов в рассолах разными методами.

В границах Ангаро-Ленского артезианского бассейна из скважин, пробуренных в пределах нефтегазоносных месторождения в период 2013–2022 гг., отобраны представительные 13 проб рассолов из соленосной и подсолевой гидрогеологических формаций. Глубина отбора проб составляла 1630.0–3074.6 м. Подземные воды представляют собой крепкие, весьма крепкие и предельно насыщенные рассолы хлоридного кальциевого или магниево-кальциевого типа с минерализацией $300.3\text{--}590.6 \text{ г/дм}^3$, с плотностью $1.223\text{--}1.411 \text{ г/см}^3$ и pH 4-5. Химический состав рассолов проанализирован в ЦКП «Геодинамика и геохронология» (ИЗК СО РАН, г. Иркутск) на основе количественных инструментальных методов: концентрация K^+ , Na^+ , Li^+ , Rb^+ , Cs^+ , Sr^{2+} – методом пламенной фотометрии на атомно-абсорбционном спектрофотометре SOLAAR M (Thermo Elemental, IN-TERTECH Corporation, США), содержание анионов (а также Ca^{2+} , Mg^{2+}) – титриметрическим методом, концентрация SO_4^{2-} – весовым методом. Микрокомпоненты были определены методом ICP MS на NexION 300D (США) по сертифицированной методике NSAM 480-X в НИ ТПУ (г. Томск).

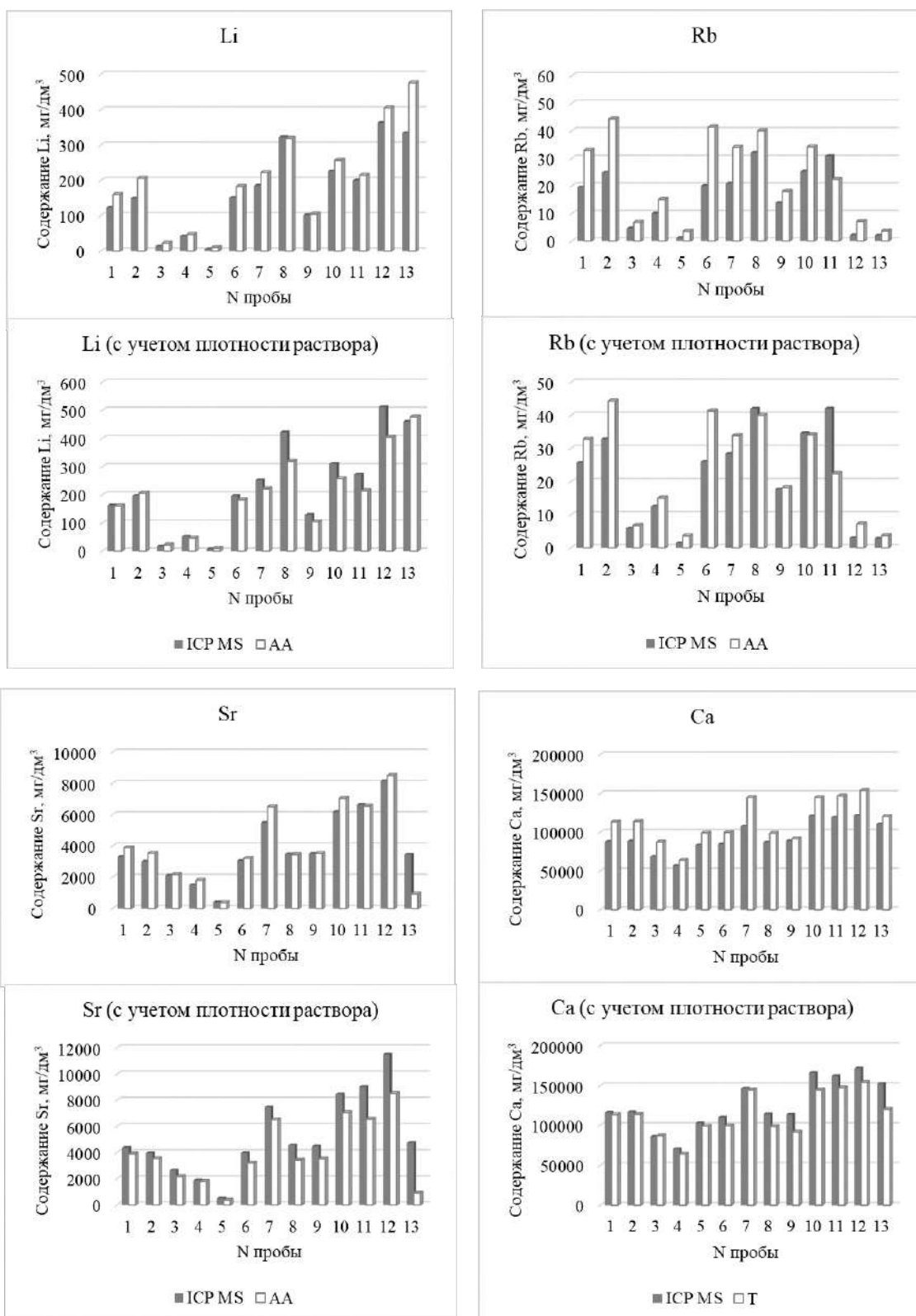
Для оценки сходимости результатов определения содержания некоторых макро- и микрокомпонентов в составе рассолов выполнено сравнение концентраций Li, Rb, Sr и Ca в 13 пробах охарактеризованных выше рассолов (таблица).

На диаграммах (рисунок) хорошо заметна разница между результатами определения содержания некоторых микро- и макрокомпонентов различными методами. На верхних диаграммах для каждого элемента содержание Li, Rb, Sr (серые столбики), определенное ICP MS, практически во всех пробах заметно ниже таковых, определенных атомно-абсорбционным методом (белые столбики). При масс-спектрометрическом анализе не учитывалась плотность рассолов исследуемых проб, которая изменяется от 1.233 до 1.411 г/см^3 при минерализации $300.67\text{--}590.57 \text{ г/дм}^3$, поскольку аликвота отбиралась по объему.

Содержание некоторых компонентов химического состава рассолов, полученное по традиционным методикам (1) и ICP MS (2)

№ п/п	№ скв.	Плотность, г/см ³	Содержание Li, мг/дм ³			Разница	
			1 (А)	2		(А–Б), мг/дм ³	%*
				Без учета плотности	(Б) С учетом плотности		
1	10-Р	1.323	160.27	122.786	162.45	–2.18	0.7
2	2 (ВИ)	1.32	206.30	148.896	196.54	9.76	–2.4
3	7	1.255	22.70	13.271	16.65	6.04	–15.4
4	1 (СВ)	1.24	47.10	41.991	52.07	–4.97	5.0
5	11	1.233	10.63	5.670	6.99	3.64	–20.7
6	2	1.302	182.79	151.054	196.67	–13.88	3.7
7	1 (СН)	1.361	222.41	185.108	251.93	–29.52	6.2
8	72	1.31	319.35	322.453	422.41	–103.06	13.9
9	97	1.278	104.78	101.667	129.93	–25.15	10.7
10	3	1.371	257.40	226.430	310.44	–53.04	9.3
11	323	1.362	214.9	199.886	272.25	–57.35	11.8
12	3А	1.411	405.23	362.747	511.84	–106.61	11.6
13	2084	1.377	476.41	334.354	460.41	16.00	–1.7
Содержание Rb, мг/дм ³							
1	10-Р	1.323	32.85	19.43	25.71	7.14	–12.2
2	2 (ВИ)	1.32	44.30	24.86	32.81	11.49	–14.9
3	7	1.255	6.74	4.64	5.82	0.92	–7.4
4	1 (СВ)	1.24	15.05	10.06	12.47	2.58	–9.4
5	11	1.233	3.61	1.09	1.35	2.26	–45.6
6	2	1.302	41.32	19.99	26.02	15.30	–22.7
7	1 (СН)	1.361	33.94	20.86	28.39	5.54	–8.9
8	72	1.31	39.97	32.04	41.98	–2.01	2.4
9	97	1.278	18.09	13.79	17.62	0.47	–1.3
10	3	1.371	34.12	25.21	34.56	–0.44	0.6
11	323	1.362	22.4	30.86	42.04	–19.64	30.5
12	3А	1.411	7.13	2.15	3.04	4.09	–40.2
13	2084	1.377	3.73	2.05	2.82	0.91	–13.9
Содержание Sr, мг/дм ³							
1	10-Р	1.323	3902.65	3309.19	4378.06	593.46	–8.2
2	2 (ВИ)	1.32	3537.64	3001.22	3961.61	536.42	–8.2
3	7	1.255	–	2116.78	2656.55	–2116.78	–
4	1 (СВ)	1.24	–	1518.74	1883.23	–1518.74	–
5	11	1.233	–	409.60	505.03	–409.60	–
6	2	1.302	3211.54	3051.26	3972.73	160.28	–2.6
7	1 (СН)	1.361	6514.08	5486.23	7466.76	1027.85	–8.6
8	72	1.31	3452.14	3477.40	4555.39	–25.26	0.4
9	97	1.278	3523.16	3504.24	4478.42	18.92	–0.3
10	3	1.371	7052.33	6182.41	8476.08	869.92	–6.6
11	323	1.362	6556.71	6631.65	9032.31	–74.94	0.6
12	3А	1.411	8514.14	8153.02	11503.91	361.12	–2.2
13	2084	1.377	933.73	3450.52	4751.37	–2516.79	57.4
Содержание Са, мг/дм ³							
1	10-Р	1.323	113688.92	87896.46	116287.02	25792.46	–12.8
2	2 (ВИ)	1.32	114254.65	88694.49	117076.73	25560.16	–12.6
3	7	1.255	87329.51	68719.36	86242.80	18610.15	–11.9
4	1 (СВ)	1.24	64151.25	56967.77	70640.03	7183.48	–5.9
5	11	1.233	99216.04	83543.14	103008.69	15672.90	–8.6
6	2	1.302	99716.84	84716.61	110301.03	15000.23	–8.1
7	1 (СН)	1.361	145027.08	107774.65	146681.30	37252.42	–14.7
8	72	1.31	98735.28	87193.42	114223.37	11541.86	–6.2
9	97	1.278	91986.21	88925.72	113647.06	3060.49	–1.7
10	3	1.371	144991.80	121098.22	166025.65	23893.59	–9.0
11	323	1.362	147034.68	119137.79	162265.67	27896.89	–10.5
12	3А	1.411	154137.86	121735.55	171768.86	32402.31	–11.7
13	2084	1.377	120546.01	110787.14	152553.89	9758.87	–4.2

Примечание. * – разница в % рассчитана по формуле ((А–Б)/(А+Б))•100.



Сравнение содержания лития, рубидия, стронция и кальция в рассолах, определенного без учета плотности раствора и с ее учетом различными методами: ICP MS – масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, AA – атомно-абсорбционный, Т – титриметрический.

Значения содержания микрокомпонентов Li, Rb, Sr выдаются заниженными по сравнению с содержаниями этих элементов, полученными методом атомной абсорбции. В ходе атомно-абсорбционной спектроскопии отбирается весовое количество раствора, которое разбавляется до нужного объема, и тем самым учитывается плотность раствора.

При умножении результатов, полученных в ходе масс-спектрометрии, на плотность растворов разница существенно сокращается (нижние диаграммы) и в среднем составляет для Li 2.5, Rb – 11.0, Sr – 4.0 % (без учета последнего анализа Sr с разницей 57.4 %, вызванной, вероятно, технической ошибкой).

То же происходит и с макрокомпонентами (например, Ca). Определение концентрации кальция в растворе методом ICP MS выполнено полуколичественно, поскольку в нормативном документе НСАМ № 480-Х нет методики измерения Ca. Титриметрический метод дает результат выше. Однако если учесть плотность растворов в первом случае, то результаты масс-спектрометрического метода сравниваются, а иногда и превысят значения, определенные традиционным методом (нижняя диаграмма).

Отклонение измеренных значений в положительную и отрицательную сторону означает отсутствие систематической ошибки анализов. Сходимость результатов измерения достаточно хорошая с учетом того, что результаты получены разными методами и в разных лабораториях.

Определение ионно-солевого состава высокоминерализованных растворов следует выполнять традиционными аналитическими методами. При определении содержания микрокомпонентов на высокоточном оборудовании с использованием прогрессивных методов элементного анализа необходимо уделять первостепенное внимание пробоподготовке, специфика которой заключается в учете плотности растворов. Для этого разведение пробы следует производить исходя из навески (не аликвоты), вес которой делить на определенную плотность и после этого доводить до необходимого для анализа объема.

Список литературы

1. Резников А.А., Муликовская Е.П., Соколов И.Ю. Методы анализа природных вод. М.: Недра, 1970. 488 с.
2. Хавезов И., Цалев Д. Атомно-абсорбционный анализ. Л., 1983. 144 с.

ЛЕЧЕБНЫЕ ВОДЫ ТУВЫ: ОТ ИССЛЕДОВАНИЙ Е.В. ПИННЕКЕРА К НАУЧНОМУ НАПРАВЛЕНИЮ АРЖААНОЛОГИЯ

Аракчаа К.Д.^{1,2}

¹Научно–исследовательский институт медико–социальных проблем и управления Республики Тыва, Кызыл, chodura@yandex.ru

²Тувинское республиканское отделение Русского географического общества, Кызыл, chodura@yandex.ru

Аннотация. Республика Тыва обладает значительным потенциалом природных водных лечебных ресурсов. Целенаправленные исследования целебных вод Тувы – аржаанов – были проведены в 1966–1967 гг. учеными Института земной коры СО РАН во главе с д.г.–м.н. Е.В. Пиннекером. С 1989 г. исследования не только аржаанов, но и феномена аржаанного лечения проводятся автором настоящей статьи, с привлечением ученых разных специальностей из разных научных учреждений Тувы и других регионов России. Более чем 35–летние исследования позволили автору сформулировать новое научное направление – аржаанологию. Это трансдисциплинарное научное направление, которое включает комплексные естественно–научные исследования лечебных вод и территорий их водопрооявления, медико–биологические исследования стихийной аржаанной бальнеотерапии и этнопсихологические исследования феномена аржаанного лечения. В статье представлены основы аржаанологии.

Ключевые слова: целебные воды, аржаанная бальнеотерапия, феномен аржаанного лечения, Тува

Abstract. The Republic of Tuva has a significant potential for natural water–based medical resources. In 1966–1967, scientists from the Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, led by Dr. E. V. Pinneker, conducted targeted research on the healing waters of Tuva, known as arzhaan. Since 1989, the author of this article has been conducting research not only on arzhaan but also on the phenomenon of arzhaan treatment, involving scientists from various fields from different scientific institutions in Tuva and Russia. More than 35 years of research have allowed the author to formulate a new scientific field: arzhaanology. This is a transdisciplinary scientific field that includes comprehensive natural science research on therapeutic waters and their water–bearing areas, medical and biological research on spontaneous arzhaan balneotherapy, and ethnopsychological research on the phenomenon of arzhaan treatment. This article presents the fundamentals of arzhaanology.

Keywords: healing waters, arzhaan balneotherapy, the phenomenon of arzhaan treatment, Tuva

Научные исследования лечебных вод Тувы, называемых местным населением аржаанами, начались еще в период Тувинской Народной Республики [9] и были продолжены в советское время [7, 8, 15]. Самые масштабные и целенаправленные исследования были проведены учеными Института земной коры СО РАН в 1966–1967 гг. под руководством д.г.–м.н. Е.В. Пиннекера [13]. Группой Е.В. Пиннекера было обследовано 45 природных водных лечебных объектов, впервые проведена их классификация, районирование, составлена карта [13, с. 17–19]. Заслугой Евгения Викторовича было подробное описание азотных и углекислых терм, углекислых холодных вод, радоновых, соленых, кислых, сероводородных, мышьяковистых вод, солено–грязевых озер. Кроме того, была дана оценка бальнеологических свойств минеральных вод и обоснованы перспективы их освоения. До настоящего времени книга Е.В. Пиннекера «Минеральные воды Тувы» является настольной книгой для всех ученых Тувы, кто занимается лечебными водами – аржаанами.

Одним из «громких» выводов Евгения Викторовича стало то, что ряд природных вод, которые местным населением используются в качестве лечебных, он квалифицировал как «лжеаржааны», согласно поскольку их состав не отличался от состава обычной питьевой воды и, соответственно, бальнеологическим нормам, они не должны обладать лечебным действием [13, с. 75–77].

С 1989 г. при активном содействии со стороны ученых г. Иркутска к.х.н. Г.М. Шпейзера, д.г.–м.н. Б.И. Писарского началось повторное изучение аржаанов Тувы к.г.–м.н. К.С. Кужугетом и к.х.н. К.Д. Аракчаа. Аржааны Тувы подразделены ими на две большие группы – минеральные и пресные [17]. Будучи носителями традиционной культуры тувинского этноса, К.С. Кужугет и К.Д. Аракчаа поставили перед собой задачу не опровергать «лечебность» пресных аржаанов, а изучить вопрос, почему же все–таки на пресных аржаанах тувинцы излечиваются подчас от серьезных заболеваний, в частности, от последствий инсультов?

Свидетельством этого являются оставленные на пресных аржаанах костыли и трости (с советского времени) и даже старые инвалидные коляски (в постсоветские годы).

С 2010 г. исследования лечебных вод Тувы проводились в трех направлениях: естественно – научные исследования самих аржаанов и территорий их проявления, медико–биологические исследования стихийной народной аржаанной бальнеотерапии и этнопсихологические аспекты феномена аржаанного лечения.

Результаты более чем 35–летних исследований [11, 1]

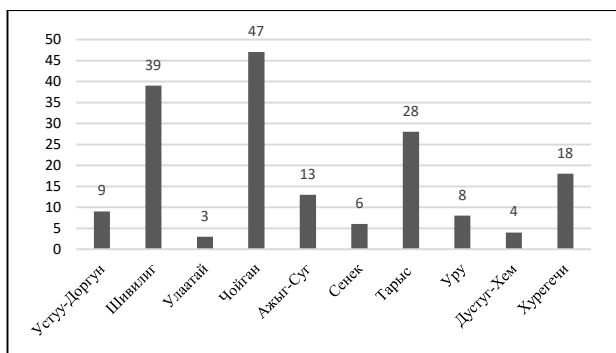
Комплексные естественно–научные исследования (гидрогеохимические, микробиологические, флористические, геомагнитные, радиологические, гелие– и радонометрия, геофизические, сейсмологические, биосферно–экологические) позволили провести классификацию аржаанов по минерализации (минеральные, пресные), по температурным характеристикам (холодные, термальные, субтермальные), по содержанию биологически активных компонентов. Выделены основные ареалы распространения холодных радоновых вод, ультракислых (рН 3–4), соленых подземных и поверхностных, углекислых холодных и термальных, сероводородных холодных и термальных вод. Пресные аржааны по питьевым качествам подразделены на воды приоритетного питьевого качества, высшей и 1–й категории качества [16]. Исследования микробных сообществ, альгофлоры позволяют оценить экологическое состояние [2], флористические – выявить потенциал лекарственных растений, которые можно было бы использовать как дополнительный лечебный ресурс при развитии организованного рекреационно–оздоровительного туризма [3].

Геомагнитные и радиологические исследования территорий аржаанов позволяют определить уровень возможного влияния на организм человека локального геомагнитного поля и радиологической обстановки. Гелиеметрия, геофизика и сейсмология являются ключевыми методами для исследования глубинных процессов, определяющих происхождение и условия формирования как минеральных, так и пресных аржаанов. Комплексные биосферно–экологические исследования, включающие изучение флоры и фауны, почвенного покрова, ландшафтных особенностей и метеорологических условий на территории аржаана и прилегающих местностей, предоставляют основу для оценки как текущего экологического состояния природной среды, так и допустимого уровня антропогенной туристической нагрузки [10].

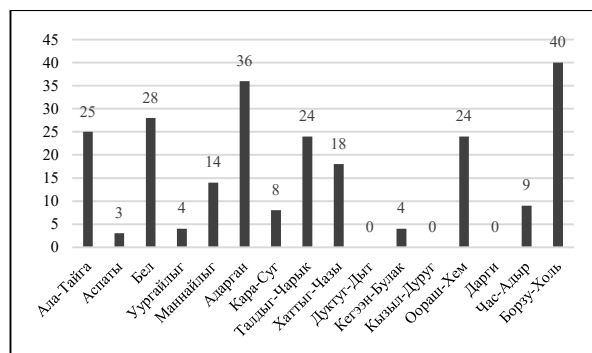
В последние годы уделяется внимание содержанию эссенциальных микроэлементов в водах аржаанов Тувы, что позволяет выделять уникальные гидрогеохимические провинции вод, таких как, например, селеновые, литиевые. Основная цель этих исследований – разработка на основе методов медицинской географии практических мер по профилактике заболеваний, возникающих вследствие дефицита или избытка этих жизненно важных элементов.

Медико–биологические исследования аржаанной бальнеотерапии включают этапы донозологический, доклинический и клинический. Донозологические исследования 2012–2014 гг. непосредственно на аржаанах Тувы, суть которых состояла в изучении состояния основных систем и функций организма человека (нервная, сердечно–сосудистая, дыхательная, двигательная функция и т.д.) до и после аржаанного лечения, показали уникальный результат: пресные аржааны обладают оздоравливающим эффектом не ниже, а в некоторых случаях даже выше, чем минеральные аржааны, априори обладающие лечебным действием. В частности, такой интегральный показатель, как уровень соматического здоровья в процентах к исходному состоянию изменялся в широких пределах – от 4 до 47 %, и для минеральных аржаанов в среднем составил 17.5 %, для пресных – 14.5 (диаграмма: а, б) [1, 14]. Эти исследования позволили дезавуировать миф о «лжеаржаанах», возникший в конце 60–х г., и выделить пресные аржааны в отдельную группу субминеральных лечебных вод [12].

В 2016 г. были проведены доклинические исследования по изучению влияния кислой воды аржаана Ажыг–Суг, который, как показала народная практика, лечит гастриты и язву желудка, на состояние слизистой оболочки желудка у крыс. Исследования показали ярко выраженное гастропротективное действие обследованной воды [4]. С 2023 г. по Ажыг–Сугу начаты клинические испытания. Эксперименты продолжаются.



а)



б)

Диаграммы: уровень соматического здоровья при бальнеотерапии на минеральных (а) и пресных (б) аржаанах Тувы по результатам медико–биологических донозологических исследований 2014 г. (в % к исходному состоянию).

Исследования этнопсихологических основ феномена аржаанного лечения – это новое перспективное направление в изучении аржаанной бальнеотерапии. В основе этнопсихологии аржаанного лечения лежат народные методы водолечения, традиции почитания и освящения целебных вод, проведения обрядов «сан салыр» (возжигание огня с подношениями белой пищи) до и после лечения, традиции преклонения перед духами–хозяевами аржаанов, чтение буддийских мантр во время водных процедур на аржаанах и, наконец, традиции воспевания аржаанов, как целительных храмов Тувы [5].

Проведенные исследования позволили автору начать разработку нового направления в изучении природных водных лечебных ресурсов Тувы и феномена аржаанного лечения – аржаанологии [6]. Объектом аржаанологии в целом является циклическая система «вода – порода, природа – человек», предметом – 2-х сторонние взаимоотношения в данной системе. Объекты и предметы исследований – это сложные структуры, требующие применения методов разных научных дисциплин: естественно–научных, медико–биологических, социологических. Все это определяет трансдисциплинарность аржаанологии как нового инновационного направления.

Методология аржаанологии основывается на принципе научного познания «от частного – к общему». Из данной методологии выходят и задачи: сначала изучаются частные системы «вода – порода, природа», «вода – человек», «человек – природа», а затем полученные знания анализируются и обобщаются.

Список литературы

1. Аракчаа К.Д. Аржааны Тувы и феномен аржаанного лечения: 30 лет исследований // Материалы V Юбилейной Межд. науч.–практ. конф. «Курортная база и природные лечебно–оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов ...». Кызыл, 2022. С. 8–21.
2. Аракчаа К.Д., Зуев В.А., Зуева Е.В., Букаты М.Б. Микробиологические характеристики аржаанов Тувы // Материалы I Международной научно–практической конференции, Республики Тыва, ГУП РТ «Курорт «Чедер», 17 – 20 июня 2013 г. Кызыл, КЦО «Аныяк», 2013. С. 185–188.
3. Аракчаа К.Д., Смирнова И.Н., Копылова Ю.Г. Аржаан Чойган – целительная жемчужина Тувы. 3–е исправленное и дополненное издание. Кызыл, 2018. 164 с.
4. Аракчаа К.Д., Салчак С.М., Разуваева Я.Г., Смирнова И.Н. и др. Гастропротективное действие кислой минеральной воды источника Ажыг–Суг при стресс–индуцированном повреждении желудка у белых крыс. // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физкультуры. 2019, т. 96, № 2, С. 54–60.
5. Аракчаа К.Д. Аржаанная бальнеотерапия – неотъемлемая часть тувинской народной медицины // Традиционная медицина и духовные практики в современном мире: тенденции и перспективы развития: мат–лы межд. науч. конф. (Кызыл, 26–29 сентября 2023 г.). Кызыл: изд–во ТувГУ 2023. С. 8–22.
6. Аракчаа К.Д. Аржаанология – инновационное направление в изучении аржаанов Тувы и феномена аржаанного лечения // Мат. IV МНПК «Курортная база и природные лечебно–оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов ...» (Кызыл, 3 4 июля 2019 г.). Кызыл, 2019. С. 14–34.
7. Богородицкий К.Ф., Валединский В.И. Гидроминеральные ресурсы // Природные условия Тувинской автономной области. Тр. Тувинской комплексной экспедиции, Вып. 3. М.: Изд–во АН СССР, 1957. С. 105–128.
8. Волкова М.А., Яснитская Н.В. Холодные углекислые воды южной части Восточного Саяна // в кн.: «Мин. Воды Вост. Сибири». М.: изд–во АН СССР, 1963. С. 134–144.

9. Левченко В.М. Минеральные источники и грязевые озера Тувинской Народной Республики. Записки государственного гидрологического института. Ленинград. Т. 14, 1935.
10. Мониторинг экологического состояния целебных источников аржаана Тарыс в свете развития золотодобычи в бассейне реки Тайрисин–Гол Республики Тыва // Рукописный отчет. Коллектив авторов: Кальная О.И., Бадминов П.С., Ескин А.Ю., Шагун А.Н., Шауло Д.Н., Кара–сал И.Д. и др./ Гл. редактор Аракчаа К.Д. Кызыл, 2025. 153 с.
11. Оргильянов А.И., Копылова Ю.Г., Аракчаа К.Д. и др. Минеральные воды Республики Тыва: исследования последних лет // Подземная гидросфера. Материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием. Иркутск, 2021. С. 96–100.
12. Оргильянов А.И., Аракчаа К.Д., Крюкова И.Г., Сметанина И.В., Хвощевская А.А., Копылова Ю.Г. Субминеральные лечебные воды Западной Тувы // Вестник этнической медицины, 2024. № 1. С. 36–49.
13. Пиннекер Е.В. Минеральные воды Тувы. Кызыл: Тув. кн. изд., 1968. 105 с.
14. Смирнова И.Н., Аракчаа К.Д., Зайцев А.А., Абдулкина Н.Г. Уровень соматического здоровья в оценке эффективности этнологической бальнеотерапии // Науч.–практ. конф. с межд. участием. Российское кардиологическое общество. Сер. 14. Кардиоваскулярная терапия и профилактика; Специальный выпуск. М.: 2015. С. 51а.
15. Фомичева В.Н., Леонидова Н.Л., Горин Н.В. Отчет о комплексном обследовании гидроминеральных и грязевых ресурсов Тувинской АССР. Т. 1. Рукописный отчет. Место хранения Геологические фонды ТувГРЭ. г. Кызыл. М., 1966. 289 с.
16. Хвощевская А.А., Копылова Ю.Г., Аракчаа К.Д. Качество пресных подземных вод (пресных аржаанов) Тувы // Материалы V Юбилейной Межд. науч.–практ. конф. «Курортная база и природные лечебно–оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов ...». Кызыл, 2022. С. 94–100.
17. Arakchaa K.D., Shpeizer G.V., Kujuguet K.S., etc. Hydromineral resources Republic of Tuva // Conference Proceedings. V. II. P. 859–866.

ПОДГОТОВКА ГИДРОГЕОЛОГОВ В ИРКУТСКОМ НАЦИОНАЛЬНОМ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

Аузина Л.И., Верхозин И.И.

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Институт «Сибирская школа геонаук», Иркутск, lauzina@mail.ru*

Аннотация. В настоящее время «Сибирская школа геонаук» (СШГ) ИРНТУ и вместе с ней специальность «Гидрогеология и инженерная геология» находится на подъеме. Важная особенность образовательного процесса в СШГ – активное вовлечение студентов в научно-исследовательскую и коммерческую деятельность с первого курса, что возможно на основе трудоустройства и участия в международных проектах. С полным основанием можно сказать, что в СШГ происходит подготовка профессионалов в области геологии, интегрированных в международное сообщество, что существенно важнее и перспективнее стандартной подготовки выпускников с дипломами, а кроме того, обеспечивает кадровые потребности исследовательских и производственных программ ИРНТУ.

Ключевые слова: гидрогеология, инженерная геология, образование, перспективы

Abstract. Currently, the Siberian School of Geosciences (SSG) at Irkutsk National Research Technical University (IRNRTU) and the specialty «Hydrogeology and Engineering Geology» is experiencing rapid growth. A key feature of the educational process at SSG is the active involvement of students in research and commercial activities from their first year, through employment and participation in international projects. It can be said with full justification that SSG trains professionals in geology who are integrated into the international community, which is significantly more important and promising than the standard training of graduates with diplomas. Furthermore, it meets the staffing needs of Irkutsk National Research Technical University's research and production programs.

Keywords: hydrogeology, engineering geology, education, prospects

В настоящее время специалистов-гидрогеологов готовят около двадцати вузов России, из них пять находятся на территории Сибири и Дальнего Востока: Томский политехнический университет, Сибирский федеральный университет (г. Красноярск), Иркутский национальный исследовательский технический университет, Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск), Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова (г. Якутск).

История каждого из них по-своему интересна и неповторима. Однако в настоящем сообщении речь пойдет об Иркутском национальном исследовательском техническом университете (ИРНТУ), получившем сегодняшнее название в 2015 г., бывшем до этого времени Иркутским государственным техническим университетом (ИрГТУ, 1993–2015 гг.), еще раньше – Иркутским политехническим институтом (ИПИ, 1960–1993 гг.), а на заре становления – Иркутским горно-металлургическим институтом (1938–1960 гг.) и Сибирским горным институтом (1930–1938 гг.).

Подготовка специалистов геологических специальностей в Иркутске проводится с 1 мая 1930 г., когда по инициативе правления «Союззолото» был открыт Сибирский горный институт, как вуз по золоту и платине с трехгодичным сроком обучения на базе Иркутского политехникума. За период своей деятельности институт не раз изменял свое название и ведомственную принадлежность, пока не приобрел современное – Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНТУ) или «Иркутский политех».

Официально подготовка горных инженеров-гидрогеологов началась в 1966 г., когда была открыта специальность «гидрогеология и инженерная геология». В том же году на базе кафедры общей геологии произошел и первый набор студентов для подготовки специалистов этого профиля в количестве 50 человек. Выпускающая кафедра гидрогеологии и инженерной геологии была организована в 1968 г.

Однако архивы «Иркутского политеха» показывают, что чтение курсов по инженерной геологии и гидрогеологии, без которых невозможна полноценная подготовка геологов всех специальностей, проводилась начиная с 30-х годов прошлого века, практически с момента его создания.

Подтверждением тому служит выписка из приказа № 73 по ИГМИ НКТП от 26 марта 1938 г.: «В целях сокращения малочисленных кафедр произвести объединение кафедры общей геологии и гидрогеологии с кафедрой исторической геологии и геологии Союза».

Специалисты по гидрогеологии и инженерной геологии работали на геологоразведочном факультете практически с момента его создания. Одним из них был профессор Львов А.В., известный отечественный специалист по геологии, инженерной геологии, гидрогеологии и мерзлотоведению, который обеспечивал решение проблем инженерной геологии при проектировании и строительстве Кругобайкальской, Забайкальской и Амурской железных дорог. Профессор А.В. Львов работал в горном институте с момента его создания до 1939 г.

Образованию кафедры гидрогеология и инженерная геология в Иркутском политехническом институте (ИПИ) предшествовала большая работа одного из ведущих гидрогеологов России, заведующего лабораторией гидрогеологии Института земной коры (ИЗК СО РАН), доктора геолого-минералогических наук Е.В. Пиннекера, ставшего первым ее руководителем (1968–1971 гг.). Многие годы основные дисциплины на кафедре читали сотрудники ИЗК СО РАН: Ю.Б. Тржцинский, И.А. Зарубин, И.С. Ломоносов, Б.И. Писарский, В.Г. Ясько, Л.Л. Шабынин, М.Н. Васина.

С 1971 по 1996 г. кафедру возглавлял лауреат Ленинской премии, один из первооткрывателей крупнейшей ураноносной провинции в мире, д.г.-м.н., профессор В.М. Степанов. В это непростое время создавалась ее учебная база – лаборатории грунтоведения, гидрогеохимии, моделирования фильтрационных процессов. На базах учебных геологических практик, вначале в с. Попово, а затем в с. Черноруде Ольхонского района Иркутской области создаются геолого-гидрогеологические полигоны, оборудованные кустами скважин, что позволило погрузить студентов в реальные полевые работы и значительно усовершенствовать учебный процесс.

Несколько позже между корпусами ИПИ был оборудован мерзлотно-гидрогеологический полигон, на котором студенты проводили наблюдения за режимом подземных вод и температурой горных пород. В это же время была создана и мерзлотная лаборатория, оборудованная камерой искусственного климата, в которой моделировались процессы морозного пучения.

Уже в эти годы преподаватели и сотрудники кафедры выполняли ответственные договорные работы с Иркутским геологическим управлением. Из числа студентов старших курсов были сформированы полевые отряды, которые под руководством преподавателей выполняли работы по изучению гидрогеологических и инженерно-геологических условий Коршуновского, Нерюндинского и Капаевского железорудных месторождений севера Иркутской области, золоторудных месторождений Ленского узла и Забайкалья. Таким образом, сотрудники кафедры постоянно проводят и проводят в настоящее время договорные работы гидрогеологического, инженерно-геологического, геокриологического и геоэкологического направлений.

Неотъемлемой частью становления кафедры являлась научная деятельность ее сотрудников. Кафедра организовывала конференции и совещания, публиковала научные материалы, посвященные вопросам гидрогеологии и инженерной геологии Восточной Сибири. Ряд выпускников кафедры прошел стажировки и обучение в аспирантуре ведущих вузов Союза, защитив кандидатские диссертации.

Были установлены международные научно-исследовательские связи с Фрайбергской горной академией (Германия), Братиславским университетом (Словакия), Монгольским техническим университетом, Хэйбейским геологическим институтом (Китай), Вроцлавским университетом (Польша), Южно-Каролинским университетом (США). Длительное время кафедра участвовала в работе Керуленской межвузовской геологической экспедиции, организованной в 1974 г. в рамках международного сотрудничества высших учебных заведений.

В сложные годы перестройки (1992 г.) для выполнения хоздоговорных работ на кафедре была создана хозрасчетная структура «Экспертно-производственная группа».

Летом 2010 г. начался непрерывный процесс «укрупнения» – две кафедры бывшего факультета геологии, геоинформатики и геоэкологии, геологической съемки, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых (РМ) и гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии (РГ) были объединены в единую кафедру прикладной геологии.

С 1997 г. по 2017 г. сначала кафедрой гидрогеологии и инженерной геологии, а затем кафедрой прикладной геологии руководил канд.геол.-мин.наук, проф. И.И. Верховин. В этот период времени экспертно-производственная группа была реорганизована в центр геолого-экологических исследований, а затем в Научно-исследовательский и проектный институт «Геология, инженерные изыскания и геоэкология». Сотрудниками этих подразделений за годы их деятельности выполнено более 2000 профильных договорных работ, в которых принимали участие как преподаватели, так и студенты.

В 2018 г. все оставшиеся после перестройки кафедры бывшего факультета геологии, геоэкологии и геоинформатики были объединены в единую структуру, названную кафедрой прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем. Объединенная кафедра, как и ранее, готовила горных инженеров по пятилетнему учебному плану.

В течение нескольких последующих лет набор студентов на специальность гидрогеология и инженерная геология в ИРНИТУ был связан со значительными трудностями: отсутствием самостоятельности и жесткой соподчиненностью специальностей геологической направленности, недостаточной привлекательностью профессии для абитуриентов и ее престижем в целом, спецификой набора в ИРНИТУ – гидрогеологов набирали через год, чередуя с приемом геологов, что значительно усложняло организацию учебного процесса. Кроме того, большие сложности сопровождали организацию учебных практик, что было связано с прекращением работ на учебной базе «Черноруд».

В декабре 2023 г., кафедра вошла в состав департамента образовательных технологий «Сибирской школы геонаук» ИРНИТУ, продолжая подготовку горных инженеров-гидрогеологов по программе специалитета.

В настоящее время формируются условия для эффективной и стабильной подготовки гидрогеологов в университете – ежегодно набирается группа из 25 человек по направлению «Прикладная геология». На втором курсе студенты делятся на подгруппы в соответствии со специализациями: «гидрогеология и инженерная геология» и «геологическая съемка, поиски и разведка месторождений твердых полезных ископаемых». Учебные практики проходят на хорошо оборудованной специализированной базе «Черноруд», где с первого курса отбираются студенты для выполнения работ по договорам с производственными предприятиями, что способствует их профессиональному становлению, формированию необходимых Hard и Soft Skills и интеграции в реальные производственные условия.

На учебной практике суммарной длительностью 12–14 недель студенты 1–2 курса получают всесторонний набор профессиональных компетенций, выполняя полный комплекс геологоразведочных работ – от маршрутов до составления отчетов с использованием современных ГИС-технологий. Кроме вполне квалифицированного описания геологических объектов, студенты осваивают методики проведения и обработки опытно-фильтрационных исследований, включающих опытные кустовые откачки, наливов в шурфы, тартание из колодцев, а также выполнения полевых гидрогеохимических анализов, гидрометрических замеров и расчетов, площадных и скважинных геофизических исследований. Кроме того, студенты получают навыки работы с беспилотными летательными аппаратами. В заключение в результате камеральной обработки материалов составляются ГИС-проект и отчет с последующей его защитой.

Полученные компетенции позволяют студентам принимать участие в договорных работах практически с 1-го курса, поскольку производится быстрая подготовка и тщательный отбор студентов не только в рамках учебных практик, но и в результате внедрения проектной деятельности в образовательные программы. Это инновационная междисциплинарная форма

обучения, предусматривающая участие студентов в решении какой-либо существующей профессиональной проблемы или задачи, с которой он может столкнуться в будущем, при этом предполагается вовлечение в проект заказчиков, консультантов и экспертов из профессионального сообщества.

Успешному освоению учебной программы и получению соответствующих компетенций содействуют созданные в институте «Сибирская школа геонаук» ИРНИТУ департамент инженерной геологии и лаборатория гидрогеологии, а также современное оборудование и аккредитованные лаборатории, в т.ч., химико-аналитическая лаборатория и лаборатория инженерной петрологии и мерзлотоведения.

Еще один немаловажный аспект для профессионала любого направления – это владение терминологией, умение представить полученные результаты перед публикой. Этими навыками студенты овладевают, выступая на конференциях различного уровня и прежде всего – на ежегодных форумах «Игошинские чтения» и «Геонауки», представляя результаты работ, полученные в рамках проектной деятельности, производственных практик, участия в разнообразных международных программах: российско-китайских «Байкал – жемчужина мира», «Янцзы – главная артерия Восточного Китая» и российско-африканской «Летний университет РАФУ». Еще один результат проведения российско-китайских экспедиций – разработка виртуального двуязычного атласа, предназначенного для представления на медиа интернет-портале и включающего четыре части: район базы практик «Черноруд», Приольхонье, центральную часть БРЗ, дельту р. Янцзы и прилегающие территории.

Участие в международных проектах позволяет приобретать интернациональные коммуникативные навыки, дает представление об уровне развития технологий за рубежом, мотивирует изучение английского языка.

Таким образом, завтрашний день подготовки инженеров-гидрогеологов представляется вполне перспективным в аспекте общей стратегии развития СШГ, в основе которой находится подготовка молодых специалистов, ориентированных на решение практических задач, владеющих базовым английским языком и интегрированных в международное профессиональное сообщество, которые пользуются повышенным спросом в связи с интенсификацией освоения ресурсной базы Восточной Сибири и развивающихся на ее основе производственных организаций.

СОВРЕМЕННЫЕ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПЛАСТОВЫХ ВОД АПТ-АЛЬБ-СЕНОМАНСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Плавник А. Г.¹, Сальникова Ю. И.^{1,2}

¹ *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН Западно-Сибирский филиал, Тюмень, plavnikag@ipgg.sbras.ru*

² *Тюменский индустриальный университет, Тюмень, salnikovaji@tyuiu.ru*

Аннотация. Проанализированы результаты многолетнего мониторинга пластовых вод апт-альб-сеноманского водоносного комплекса (более 4700 проб), используемых при эксплуатации месторождений углеводородов Западной Сибири. На основе расчета стандартных отклонений содержания компонентов ионно-солевого состава пластовых вод и их сопоставления с погрешностями лабораторных методов определения установлено, что вариации в содержании ионов натрия и хлора сопоставимы с погрешностями аналитических методов. Для других компонентов – ионов кальция, гидрокарбоната, йода и брома – вариации существенно превышают аналитическую погрешность. Полученные результаты отражают различие природы содержания рассматриваемых компонентов в подземных водах – для ионов натрия и хлора источником являются морские воды, для других компонентов – литологический состав вмещающих отложений, для которого характерна существенная неоднородность.

Ключевые слова: *Западно-Сибирский мегабассейн, апт-альб-сеноманский комплекс, гидрогеохимический мониторинг*

Abstract. The results of long-term monitoring of formation waters of the Aptian-Albian-Cenomanian aquifer complex (more than 4700 samples) used in the exploitation of hydrocarbon deposits in Western Siberia are analyzed. Based on the calculation of standard deviations of the content of components of the ion-salt composition of formation waters and their comparison with the errors of laboratory methods for their determination, it was established that variations in the content of sodium and chlorine ions are comparable with the errors of analytical methods. For other components – calcium, bicarbonate, iodine and bromine ions – the variations significantly exceed the analytical error. The obtained results reflect the difference in the nature of the content of the components under consideration in groundwater: for sodium and chlorine ions, the source is seawater, for other components, the lithological composition of the enclosing sediments, which is characterized by significant heterogeneity.

Keywords: *West Siberian megabasin, Aptian-Albian-Cenomanian complex, hydrogeochemical monitoring*

В Западной Сибири геохимическая трансформация подземных вод нефтегазоносных комплексов, вызванная длительным периодом ведения промысловых работ, связана с процессами заводнения нефтяных залежей для повышения нефтеотдачи и размещением в недрах излишков попутно добываемых вод. Актуальность исследования определяется недостаточной изученностью условий формирования современных гидрогеохимических условий Западно-Сибирского мегабассейна, в частности природы вариативности показателей химического состава проб подземных вод, которые фиксировались также и в период поисково-разведочных работ [2, 3].

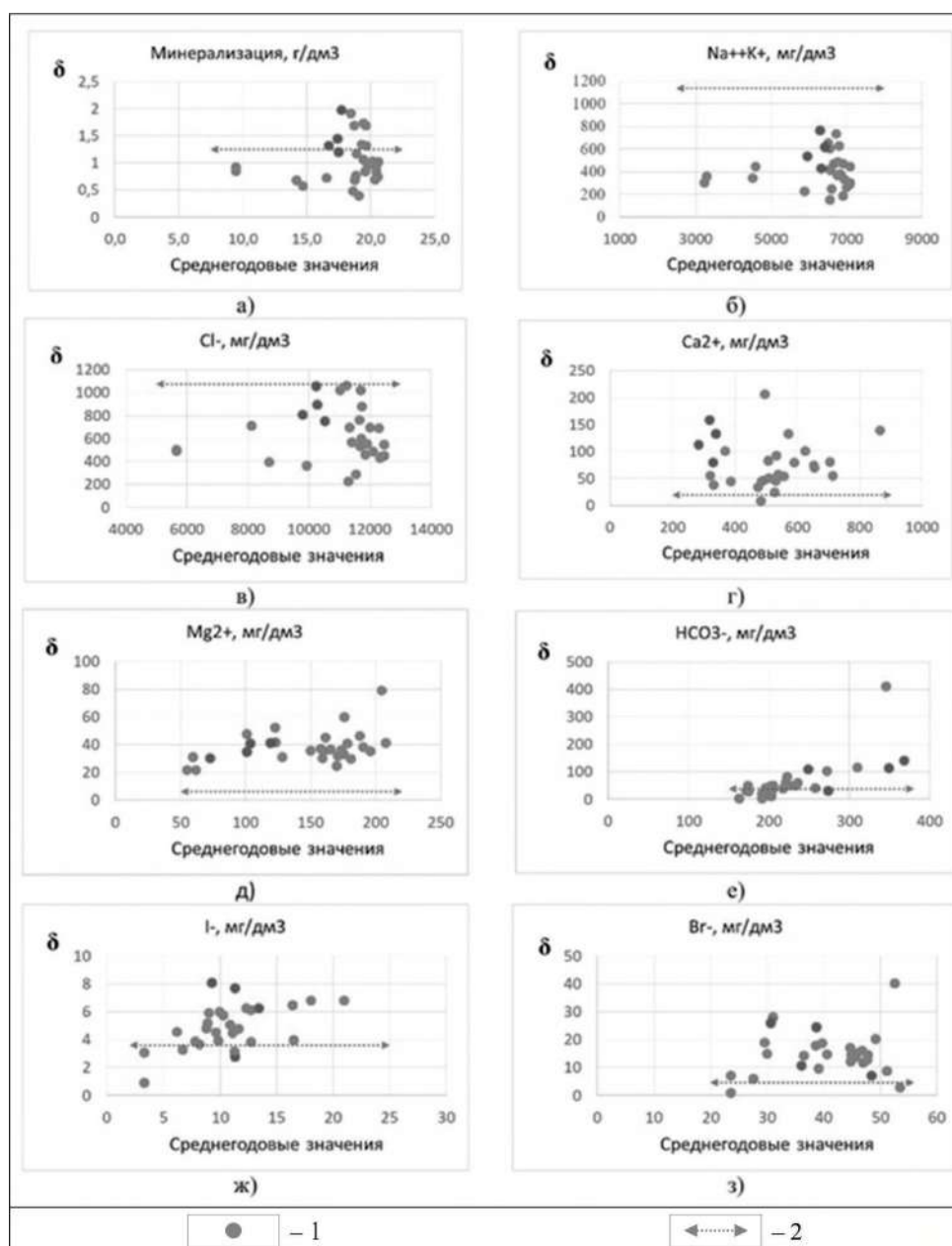
По результатам исследований химического состава подземных вод апт-альб-сеноманского водоносного комплекса (ААС ВК) на Западно-Усть-Балыкском, Мегионском и Тайлаковском нефтяных месторождениях с продолжительным периодом эксплуатации установлено, что в настоящее время сохраняется природное гидрогеохимическое равновесие в системе вода – порода исследуемого комплекса [1, 4]. В продолжение этих исследований с целью изучения современных условий формирования гидрогеохимического режима в процессе техногенного воздействия в данной работе рассматриваются результаты длительных исследований состава подземных вод ААС ВК Западно-Сибирского мегабассейна на месторождениях углеводородов (27 водозаборных участков и 19 участков закачки), расположенных на территории Среднеобской, Надым-Пурской и Пур-Тазовской нефтегазоносных областей (НГО) Западной Сибири.

За весь период наблюдений накоплен значительный объем информации (более 4700 проб) о составе пластовых вод апт-альб-сеноманских отложений на объектах мониторинга. Наблюдения за качеством подземных вод в основном включали определение содержания основных макро- и микрокомпонентов и других параметров. Достоверность аналитических данных подземных вод проверялась использованием условий электронейтральности раствора

(равенства содержания сумм анионов и катионов в миллиграмм-эквивалентной форме) и материального баланса (равенства расчетной минерализации и полученного при анализе сухого остатка).

Содержание макро- и микрокомпонентов в пластовых водах ААС ВК

Месторождение	Кол-во	Ca ²⁺ , мг/дм ³		Mg ²⁺ , мг/дм ³		HCO ₃ ⁻ , мг/дм ³		Γ, мг/дм ³		Br ⁻ , мг/дм ³	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Среднеобская НГО											
Аганское	674	357.0	654.6	113.7	233.4	169.2	312.0	1.5	19	2.0	68.8
Аригольское	60	293.5	420.8	32.2	115.5	121.5	237.8	1.3	4.7	22.0	34.7
Ачимовское	176	457.8	668.4	73.0	230.9	135.1	329.3	2.9	19.6	12.5	85.0
Ватинское	266	490.8	850.7	149.4	290.5	157.1	262.3	1.0	20.8	2.4	59.5
Западно-Асомкинское	12	277.2	477.0	45.6	133.8	189.2	224.2	16.1	25.8	2.4	81.0
Западно-Усть-Балыкское	270	288.5	436.7	63.9	177.7	217.6	657.4	1.3	22.0	2.4	56.3
Западно-Чистинное	7	476.0	488.0	131.3	187.6	187.7	240.0	11.8	21.0	16.1	34.7
Ининское	33	693.7	1008.0	70.1	231.1	103.2	279.7	0.9	14.5	19.2	62.0
Кетовское	59	412.1	751.5	54.0	194.2	110.6	268.5	1.9	21.4	12.4	70.0
Локосовское	55	314.0	881.7	30.0	199.0	85.1	199.0	3.4	22.0	2.4	60.0
Максимкинское	39	216.9	433.9	24.3	121.6	122.0	221.7	0.2	10.6	12.2	77.0
Мегионское	176	609.6	828.0	67.0	265.2	159.0	235.9	2.1	21.4	22.3	60.7
Мыхпайское	63	589.7	868.4	142.6	259.4	162.4	362.0	1.7	19.9	12.4	59.3
Ново-Покурское	156	380.8	601.2	106.0	224.1	155.4	329.5	2.4	23.8	20.9	74.0
Островное	88	339.7	575.9	130.3	256.3	168.9	314.6	12.8	21.6	21.6	31.7
Покамасовское	118	301.2	654.6	97.0	279.7	136.7	379.5	8.1	20.7	31.3	88.0
Северо-Ореховское	90	536.4	821.6	85.0	396.7	140.0	256.2	6.7	16.5	50.5	59.5
Северо-Островное	262	270.5	648.3	82.2	210.5	146.4	573.6	1.6	20.3	12.4	53.9
Северо-Покурское	238	501.7	793.2	91.0	352.6	169.8	226.0	0.2	12.7	23.5	59.0
Тайлаковское	783	386.7	554.5	102.4	201.6	199	627.2	2.5	25.5	18.0	72.7
Узунское	135	290.6	1082.0	93.2	267.0	116	299.7	1.8	11.0	23.5	53.2
Чистинное	155	396.3	633.1	112.1	220.2	168.7	266.3	4.6	21.7	12.4	82.0
Южно-Островное	58	415.9	555.0	136.1	250.1	132.5	1181	10.4	26.1	12.4	80.5
Южно-Покамасовское	162	414.8	522.5	127.5	279.7	67.1	282.2	2.0	15.3	12.4	57.1
Пур-Тазовская НГО											
Пяяхинское	234	65.1	725.6	28.5	90.8	121.0	533.9	6.2	21.4	22.5	74
Тазовское	27	214.2	634.2	54.9	159.9	221.6	610.0	16.3	14.7	40.5	43.2
Надым-Пурская НГО											
Уренгойское	101	110.2	929.9	8.5	287.0	24.4	608.8	0.3	21.1	24	66.5
Северо-Губкинское	243	214.2	634.2	54.9	159.9	221.6	610	0.6	17.6	25.0	80
Всего:	4740										



Стандартные отклонения среднегодовых значений гидрогеохимических показателей (*а* – минерализация, *б* – натрий, *в* – хлор, *г* – кальций, *д* – магний, *е* – гидрокарбонат, *ж* – йод, *з* – бром): 1 – среднегодовое значение показателя по месторождению; 2 – погрешность метода определения показателя.

Список литературы

1. Плавник А.Г., Сальникова Ю.И., Абдрашитова Р.Н. Гидрогеохимический мониторинг апт-альб-сеноманского водоносного комплекса в центральных районах Западно-Сибирского мегабассейна в связи с высокой техногенной нагрузкой // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2024. Т. 2, № 1. С. 145–150. DOI: 10.33764/2618-981X-2024-2-1-145-150.
2. Плавник А.Г., Сальникова Ю.И., Бешенцев В.А., Семенова Т.В. Анализ неоднородности результатов гидрогеохимического мониторинга апт-альб-сеноманского комплекса на месторождениях Западной Сибири // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2025. № 2(170). С. 39–53. DOI: 10.31660/0445-0108-2025-2-39-53.
3. Ставицкий Б.П., Курчиков А.Р., Конторович А.Э., Плавник А.Г. Вертикальная и латеральная гидрогеохимическая зональность подземных вод Западно-Сибирского нефтегазового бассейна // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2006. № 5–6. С. 58–84.
4. Salnikova Yu.I., Abdrashitova R.N., Abukova L.A., Zaliatdinov A., Poluyanov M.G. Analysis of Oil and Gas Technogenesis of the Aptian-Albian-Cenomanian Hydrogeological Complex of the West Siberian Mega Basin // International Journal of Energy Production and Management. 2025. V. 10(3). P. 523–534. DOI 10.56578/ijepm100313.

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ В СКАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Тагильцев С. Н., Пачина Е. П., Тагильцев В.С.

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, tagiltsev@k66.ru

Аннотация. Проницаемость в скальных горных породах определяется наличием взаимосвязанных пустот. Проницаемость породных массивов, которая фиксируется в настоящее время, формируется вследствие деформационных процессов, являющихся результатом современного, с геологических позиций, силового воздействия на горные породы. Сеть взаимосвязанных пустот (трещин скола) формируется на этапах предразрушения и разрушения, при которых сочетаются пластические и хрупкие деформационные процессы. Форма и размеры геологических образований, состав и свойства пород, окружающих геологические тела, особенности геологического развития определяют уровень и закономерности проявления факторов хрупкости – пластичности и напряженно-деформированного состояния в конкретных геологических и геоморфологических условиях.

Ключевые слова: проницаемость, скальные породы, деформация, хрупкость, пластичность

Abstract. Permeability in rocky rocks is determined by the presence of interconnected voids. The permeability of rock formations, which is currently being fixed, is formed as a result of deformation processes occurring under the influence of modern, geologically speaking, force action on rocks. The development of a network of interconnected voids (chipping cracks) occurs at the stages of pre-destruction and destruction, in which plastic and brittle deformation processes are combined. The shape and size of geological bodies, the composition and properties of rocks surrounding geological bodies, and the features of geological development determine the level and patterns of manifestation of factors of fragility – plasticity and stress-strain state in specific geological and geomorphological conditions.

Keywords: permeability, rock formations, deformation, brittleness, plasticity

Формирование месторождений подземных вод, скоплений углеводородов, рудных, в первую очередь жильных, месторождений определяется наличием в прошлом и возникновением новых взаимосвязанных пустот в горных породах. Массивы скальных горных пород, имеющие возраст многие миллионы лет, давно утратили первичную пористость и трещиноватость [1]. Проницаемость скальных горных пород, которая фиксируется в настоящее время, формируется в результате современного, с геологических позиций, силового воздействия на породные массивы [6].

Прочностные и хрупкопластичные свойства горных пород рассматриваются как базовые характеристики, предопределяющие условия, при которых происходят процессы предразрушения и разрушения [5]. Обычно рассматриваются следующие виды деформации: упругая, пластическая и хрупкая. Эти виды деформации последовательно сменяют или дополняют друг друга, поэтому их очень часто рассматривают как стадии деформации. Стадийность следует воспринимать как важнейшее свойство процесса деформации.

В ходе упругой деформации проявляется способность твердого тела к обратимой деформации. Далее наступает стадия пластической деформации. При развитии процесса пластической деформации возникают трещины скольжения (сдвига). При подвижках по плоскостям скольжения формируются элементарные зоны растяжения и сжатия. В зонах растяжения возникают разрывы (микротрещины отрыва или разрыва). Трещины отрыва представляют собой зародыши возникающей пустотности в скальных горных породах. Сочетание плоскости скольжения (трещины сдвига) и возникающих по ее краям трещин разрыва можно рассматривать как элементарную деформационную ячейку (рисунок).

При формировании в блоке породы значительного количества деформационных ячеек и соединении их в цепочки возникают трещины, представляющие ступенчатое образование, состоящее из трещин сдвига (скольжения) и трещин отрыва [2, 7]. Эти деформационные структуры принято называть трещинами скола. Трещины скола, получающие массовое развитие в породных блоках, можно называть структурами предразрушения или трещинами предразрушения. В зонах с наибольшими касательными напряжениями трещины скола при своем развитии переходят (соединяются) в сквозные трещины, которые нарушают сплошность породных блоков и формируют структуры разрушения (разломы) различного уровня

(порядка), и разного кинематического типа [3, 4]. Подвижки по структурам разрушения могут составлять значительные величины.

Трещинная пустотность в горных породах возникает на первом этапе хрупкой деформации при формировании трещин отрыва. Дальнейшее развитие пустот происходит при расширении трещин отрыва за счет сдвига по трещинам скольжения. Основная деформация развивается на этапе, предшествующем разрушению – этапе предразрушения. На этом этапе деформации сочетаются пластические и хрупкие деформационные процессы.



Структура деформационной ячейки.

Для большинства горных пород характерен полиминеральный состав и довольно высокий уровень неоднородности, поэтому хрупкая деформация сочетается с упругой и пластической деформацией. Взаимное наложение упругой, пластической и хрупкой стадий деформации является характерной особенностью для большинства разновидностей горных пород. Хрупкое разрушение горных пород не является актом мгновенного разрушения блока пород, а составляет определенный этап процесса деформации, его завершающую стадию [2, 7].

В геологических телах с выраженными пластическими свойствами, на стадиях предразрушения и разрушения развиваются хорошо выраженные трещины сдвига (скольжения) без формирования трещин отрыва. Эти трещины не имеют существенной пустотности, и поэтому пластичные материалы не обладают проницаемостью. В хрупких горных породах деформация на стадии предразрушения происходит за счет образования трещин двух типов – отрыва (разрыва) и скалывания. Эти трещины обеспечивают образование пустотности простым приоткрыванием. В хрупких материалах потенциал пластического скольжения ограничен, что, в свою очередь, снижает возможность формирования взаимосвязанной пустотности. В хрупких горных породах существенная проницаемость может формироваться в основном на стадии разрушения.

Таким образом, к формированию взаимосвязанной пустотности и, соответственно, проницаемости наиболее склонны горные породы, объединяющие свойства преимущественной хрупкости и имеющие элементы пластичности, т.е. пластично-хрупкие породы. Для оценки потенциальной проницаемости горных пород следует опираться на шкалу хрупкости – пластичности (ХП). Если брать за основу показатели твердости и свойства ХП основных породообразующих минералов, а также учитывать растворимость некоторых минералов, то можно рассматривать шкалу хрупкости – пластичности в виде таблицы с качественными характеристиками природных минеральных соединений [6, 7].

Согласно представленному распределению минералов по хрупкости – пластичности (таблица) к очень хрупким породам относятся кварциты и гранитоиды с высоким содержанием кварца. Нормальные граниты и средние интрузивные породы (диориты, сиениты) следует относить к хрупким. Магматические горные породы, которые относятся по своему составу к основным (габбро), следует полагать пластично-хрупкими разновидностями, а ультраосновные породы (дуниты, перидотиты) – хрупкопластичными породными разновидностями.

Распределение породообразующих минералов по хрупкости – пластичности

Группа	Характеристика	Породообразующие минералы
1	очень пластичные	талек, глина
2	пластичные	хлорит, слюды
3	хрупкопластичные	серпентин
4	хрупкопластичные растворимые	гипс, кальцит, галит
5	пластично – хрупкие	амфибол, пироксен, оливин
6	хрупкие	полевые шпаты
7	очень хрупкие	кварц

По данным многочисленных литературных источников, большинство магматических горных пород имеет высокие показатели прочности как в образце, так и в массиве. По основным количественным оценкам прочность на сжатие в массивах горных пород составляет несколько десятков МПа. Учитывая то, что трещины в горных породах появляются при напряжениях, составляющих примерно половину от предела прочности на одноосное сжатие [5], можно полагать, что минимальные напряжения в массиве горных, приводящие к образованию трещин, должны быть не менее десяти МПа. Следует сделать вывод, что только высокие тектонические напряжения могут определять формирование массовых трещин предразрушения и, тем более, структур разрушения (тектонических разломов). Представления, что основным фактором образования трещин на глубинах до ста метров и более являются экзогенные процессы, не имеют физических (геомеханических) оснований. Характер и уровень современного напряженного состояния массивов горных пород, которые залегают на конкретной территории [4], следует рассматривать как очень важную группу взаимосвязанных факторов, определяющих развитие взаимосвязанной пустотности (проницаемости) в массивах горных пород [6].

Помимо уровня тектонических напряжений, важную роль играет ориентировка векторов главных максимальных напряжений, положение геологических тел в поле тектонических напряжений [4]. Особо следует выделить влияние рельефа местности на процессы разгрузки и концентрации тектонических напряжений. Современные понижения рельефа способствуют концентрации (увеличению) напряжений и, соответственно, развитию деформаций предразрушения (трещин) и разрушения (разломов). Следует также допускать, что понижения рельефа формируются в зонах тектонических нарушений, поэтому в долинах рек фильтрационные свойства горных пород, как правило, значительно выше, чем на водоразделах. Кроме того, тектонические напряжения активно участвуют в формировании рельефа. Более крепкие породы нередко оказываются в низинах, которые окружают возвышенности из менее прочных пород. Это происходит в тех случаях, когда относительно пластичные и менее крепкие породы в поле горизонтальных тектонических напряжений деформируются и предопределяют возникновение возвышенностей.

Качественные и количественные характеристики хрупкости – пластичности минералов и горных пород, с учётом их прочности, позволяют оценивать потенциальные фильтрационные и емкостные свойства породных массивов. Пластичные породы непроницаемы, а хрупкие породы приобретают свойства проницаемости на предразрушающих и разрушающих стадиях деформации.

Сочетание в горных породах хрупких и пластичных минералов способствует формированию и раскрытию трещин скола, определяющих возникновение взаимосвязанной пустотности – основы проницаемости горных пород.

Потенциальные гидрогеологические свойства скальных горных пород реализуются степенью деформации геологических тел в поле современного напряженного состояния породных массивов. Стадия хрупкой деформации предопределяет формирование структур предразрушения (трещин) и зон разрушения (разломов) с потерей сплошности массива.

Форма и размеры геологических тел, которые являются объектами гидрогеологических исследований, состав и свойства окружающих данный объект горных пород (внешние граничные условия), особенности геологического развития определяют уровень и особенности проявления факторов хрупкости – пластичности и напряженно-деформированного состояния в конкретных геологических и геоморфологических условиях.

Список литературы

1. Антышко Б.Е. Гидрогеологические емкости горно-складчатых областей. М.: Недра. 1986. 185 с.
2. Жабко А.В. Теоретические и экспериментальные аспекты пластического деформирования и разрушения горных пород // Известия Уральского государственного горного университета. 2018. № 1(49). С. 68–79.
3. Николаевский В.Н., Шаров В.И. Разломы и реологическая расслоенность земной коры // Физика Земли. 1985. № 1. С. 16–28.
4. Тагильцев С.Н. Закономерности пространственного расположения тектонических нарушений в поле современного напряженного состояния земной коры // Горный журнал. Изв. ВУЗов. 2018. № 7. С. 52–66.
5. Тагильцев С.Н. Трение, деформация и сила тяжести как базовые понятия геомеханики // Изв. вузов. Горный журнал. 2014. № 6. С. 85–93.
6. Тагильцев С.Н. Хрупкость и пластичность минералов как фактор формирования гидрогеологических свойств массивов горных пород // Разрушение горных пород и минералов. Сборник материалов второй Всероссийской конференции (г. Екатеринбург, 1 апреля 2025 г.). Екатеринбург: Изд-во УГГУ. 2025. С. 53–54.
7. Шихин Ю.С. Геологическое картирование и оценка рудоносности разрывных нарушений. М.: Недра. 1992. 229 с.

РАННИЕ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ Е.В. ПИННЕКЕРОМ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Хаустов А.П.

*Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва,
khaustov-ap@rudn.ru*

Аннотация. Представлены результаты ранних исследований Е.В. Пиннекера в области изучения минеральных вод Восточной Сибири. Выделены наиболее интересные объекты, исследованные им лично. Многие из них опробованы впервые. Особый интерес представляют источники термальных вод, сформированные за счет: подземных пожаров и в пределах Витимского нагорья. Оценены их лечебные свойства и перспективы использования, не только в лечебных целях, но и в промышленных – для извлечения ценных компонентов.

Ключевые слова: минеральные воды, гидрогеохимия, Челолекские термы, Владимирский источник

Abstract. The results of E.V. Pinneker's early research in the field of studying the mineral waters of Eastern Siberia are presented. The most interesting objects studied by him personally are highlighted. Many of them have been tested for the first time. Of particular interest are the thermal springs formed due to unique environments: underground fires and within the Vitim Highlands. The medicinal properties and prospects of use are evaluated. In fact, these works have the prospect of being used not only for medicinal purposes, but also for industry to extract valuable components.

Keywords: mineral water, hydrogeochemistry, Chelolek thermal springs, Vladimir spring

Период конца 50-х – начала 60-х гг. прошлого столетия в жизни Е.В. Пиннекера связан с назначением заведующим лабораторией подземных вод Института геологии ВСФ АН СССР (Институт земной коры с 1962 г.). В это время в институте под руководством В.Г. Ткачук было создано научное направление по исследованию минеральных вод с соответствующим лабораторным оборудованием.

Ранее, во время обучения в Томском политехническом институте, Е.В. Пиннекер прошел отличный курс гидрогеохимических исследований под руководством П.А. Удодова, который совместно с И.П. Онуфриёнком в 1952 г. разработал широко известный поисковый «метод ТПИ», позволяющий определять в водах микроэлементы. Метод был неоднократно апробирован на большом числе объектов что, безусловно, расширило интерес к фиксации многих микроэлементов в минеральных водах. Гидрогеохимическая школа томичей всегда лидировала в данном направлении, потому Е.В. Пиннекер к началу подготовки диссертации был вполне зрелым специалистом с накопленным опытом исследований. Тем не менее минеральными водами он серьезно начал заниматься только в Иркутске.

Ранние работы Е.В. Пиннекера в области исследований минеральных подземных вод – это своего рода поиски «научного кредо», поэтому они интересны. Все эти поиски, в том числе организационные мотивы, достаточно полно и хорошо освещены в специальной книге родными, коллегами, учениками [2].

С нашей точки зрения, резкое расширение кругозора Е.В. Пиннекера по отношению к происхождению и генетической типизации минеральных вод, включая соленые воды и рассолы, произошло за счет интенсивного сотрудничества с Иркутским геологическим управлением. К началу 60-х годов трестом ВостСибнефтегеология было пробурено большое число параметрических и разведочных скважин на кембрийские отложения Сибирской платформы с целью обнаружения признаков нефти. Такие работы проводились с 30-х гг., и многим геологам-нефтяникам была ясна слабая вероятность обнаружения серьезных запасов нефти в данных формациях юга платформы, поэтому все внимание было сосредоточено на получении максимума геологической информации по результатам бурения, включая подземные воды. Такими скважинами были вскрыты самые концентрированные предельно насыщенные рассолы в Балыхтинской скважине Р5 с минерализацией 599 г/дм³. Не исключалась возможность обнаружения более концентрированных подземных вод, на что Евгений Викторович указывал при составлении классификации рассолов в соленосных толщах платформы.

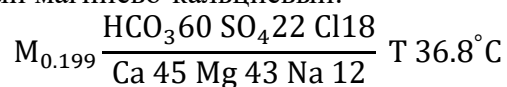
Помню веселый эпизод. В районе с. Байкальское мною был опробован постоянный источник напорных вод из гранитоидов с минерализацией 18–20 мг/дм³. В это же время отобрал пробу атмосферных осадков на акватории Байкала, минерализация которых составляла 12 мг/дм³. Предложил Евгению Викторовичу на основе таких данных оценивать метаморфизацию подземных вод на платформе и в складчатых областях. Это тоже экстремум для подземных вод – почти дистиллят по сравнению с 600 г/кг в рассолах. Он долго смеялся, потом посоветовал рассказать это студентам, чтобы понимали, как образуются подземные воды, что такое инфильтрация и как разнообразны пути их формирования. Позже совместно с Б.И. Писарским были опробованы Сосновские источники в Баргузинском заповеднике с высоким содержанием уголекислоты в водах. До минеральных они не дотягивали, минерализация была крайне низкой – около 60 мг/дм³.

Е.В. Пиннекером в тот же период были зафиксированы максимальные содержания сероводорода (до 240 мг/дм³) в воде скважины у с. Половина. Экстремальных значений компонентов химического состава вод, как и многих микроэлементов, в том числе с промышленными содержаниями, в рассолах платформы было выявлено очень много. Это позволило существенным образом изменить взгляды не только на их лечебные свойства, но и на возможности использования рассолов как сырья для получения редкоземельных элементов.

Первое крупное обобщение по минеральным водам Иркутской области было проведено в соавторстве с В.Г. Ткачук в 1959 г. Итог работ – Схематическая карта минеральных вод [7]. Отмечу, что это было очень своевременное издание, создавшее основу народнохозяйственного использования минеральных вод на основе качественных аналитических определений их химического состава.

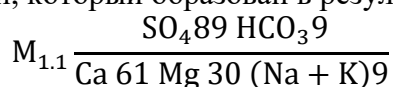
Как-то он высказал идею, что изученность подземных вод Иркутской области позволяет в каждой крупной больнице пробурить скважину и организовать свой ванный корпус с заданными типами минеральных вод. В монографиях [3, 4] представлены характеристика и каталог наиболее перспективных вод для развития санитарно-курортного лечения в области с учетом разнообразия их химического состава. Евгений Викторович отчетливо понимал важность отбора и подготовки проб при аналитических исследованиях минеральных вод. Слабо был изучен газовый состав, преимущественно анализировались свободные газы и только в 70-х гг. удалось впервые наладить газовую хроматографию в ИЗК, к организации которой Евгений Викторович приложил огромные усилия.

Хотелось бы отметить роль Е.В. Пиннекера как первого исследователя Челолекских термальных вод (или Теплый ключ на одноименной реке в 18 км от устья впадения в р. Витим) в Бодайбинском районе с температурой 36.8 °С [5]. Сам по себе выход подземных вод для Витимского нагорья – большая редкость. Местность чрезвычайно труднодоступная; по рассказам, маршрут занял несколько дней, но данные стоили того. Дебит источника 8 л/с, он приурочен к протерозойским известнякам, минерализация около 200 мг/дм³. По составу сульфатно-гидрокарбонатный магниевый-кальциевый:



Литологический состав и возраст водоносных пород – протерозойские известняки. Состав источника не типичен для таких температур, а с учетом происхождения его можно отнести к термальным водам тектонических разломов карстовых областей. Новые данные по химическому составу нам найти не удалось, так что сам факт публикации анализа оставляет приоритеты Е.В. Пиннекеру.

Второй интересный объект в центральной части Иркутского угленосного бассейна – рядом с поселком Шахты «Владимир» (г. Черемхово?) известен как источник горячих минеральных вод Владимирский, который образован в результате подземного пожара [6].



Появление горячей воды в нем связано с подземным пожаром углей над питающим источник водоносным горизонтом. Начало подземного пожара относят к 1915 г. Температура

воды источника летом 1960 г. составляла 31.6 °С. Вода выходила из обожженных алевролитов и песчаников. Дебит источника 0.06 л/сек. Из химических компонентов в воде преобладают сульфаты и кальций. Сумма солей равна 0.8–1.2 г/дм³.

Жители ближайших окрестностей успешно излечивали ревматизм и суставные заболевания. Для тушения подземного пожара на склоне выше источника в 1956 г. было пробурено несколько скважин с последующей закачкой в них илистого раствора и воды. Созданная подземная перемычка приостановила распространение пожара. Постепенно стала снижаться температура воды. В 1954 г. она была выше, чем в 1960 г., и равнялась 38.5 °С. Резко снизился расход источника. Затухание подземного пожара отразилось на составе растворенного газа источника; в 1954 г., во время интенсивного горения угля, содержание СО₂ превышало 60 %, а в 1960 г. оно уменьшилось до 17 %.

Пример актуален тем, что Евгений Викторович уже в то время осознал проблему утилизации шахтных и подотвальных вод. Проявление шахтных вод в виде термальных выходов он рассматривал как техногенный феномен, поскольку на платформе таковых естественных выходов встречено не было. Публикация была чрезвычайно интересна и помещена в популярный журнал «Природа» [6].

Тесное содружество с производственными организациями Иркутска позволило сотрудникам лаборатории опробовать источники и создать обширный каталог минеральных вод. Личный вклад Е.В. Пиннекера в обобщение материалов чрезвычайно высок. Он уже в то время отчетливо понимал важность таких работ не только для лечебных целей, но и для потенциального извлечения из рассолов многих химических элементов. В частности, в то время происходил переход пищевой промышленности на йодированную соль. Промышленности был необходим бром и редкоземельные элементы. Все это было в концентрированных рассолах Сибирской платформы, но не было технологий их извлечения, поэтому приоритеты отдавались твердым полезным ископаемым. Тем не менее сам процесс добычи той же поваренной соли свидетельствовал о перспективности добычи «жидкой руды». Евгений Викторович неоднократно на многих совещаниях выступал с соответствующими докладами, но, увы, поддержки со стороны производителей не было. В то же время в Крыму (г. Саки) добывался бром из соленого озера, но технологии были крайне затратны вследствие их несовершенства.

По опубликованным материалам с 1955 по 60-е гг. лично Е.В. Пиннекером проведен анализ опробований минеральных вод. Реализация этих работ, особенно в глубоких скважинах, лимитировалась отсутствием качественных пробоотборников и техническим состоянием скважин, поэтому предпочтение отдавалась изливающимся скважинам и естественным выходам разгрузки минеральных вод известных источников. Всего им было отобрано и проанализировано более 30 пунктов с различными типами вод, а с коллегами это число значительно больше. Преимущественно это были хлоридные натриевые солоноватые и соленые воды с минерализацией 2–35 г/дм³. Некоторые были опробованы впервые, для других значительно уточнен химический состав. Большое внимание уделялось газовому составу вод. Большая часть – это сероводородные воды с выраженным бальнеологическим эффектом: Сосновская скважина близ ст. Мальта, Мальтинская скв.1, родник Ключевской на р. Киренга. В то же время были определены содержания радона 84 эмана, практически достаточные для выделения самостоятельного бальнеологического типа, например, в группе родников в р-не дер. Каймоново по правому и левому берегу р. Куты, левого притока Лены. Содержание брома в источниках достигало 14 мг/дм³ с общей минерализацией 24.6 г/дм³. Отличные показатели для приема наружных ванн.

Хлоридные натриевые рассолы минерализацией 35–320 г/дм³ – это, прежде всего, скв. Нукутская 1, давшая начало строительству курорта в с. Нукуты. Содержание сероводорода почти 450 мг/дм³ свидетельствует о сложных процессах образования уникального органического вещества в этих водах. Впоследствии мы неоднократно проводили сложнейшие анализы органических веществ этих вод с перспективой изготовления лечебных препаратов. Из радоновых вод Е.В. Пиннекер приводит данные родника в 0.2 км выше устья р. Турки, на

левом берегу р. Лены с содержанием этого лечебного компонента 280 эман при минерализации 157 г/дм^3 и содержании брома 24 мг/дм^3 . Источник действительно уникальный. Из хлоридных натриево-кальциевых, магниевых-кальциевых и кальциевых рассолов с минерализацией $320\text{--}600 \text{ г/дм}^3$ можно обратить внимание на высочайшие концентрации сероводорода и брома (бромоносные рассолы), а также многих редкоземельных элементов, которые фиксируются практически во всех скважинах.

По данным современных работ А.Г. Вахромеева, в рассолах Сибирской платформы содержание лития, брома, магния и других элементов в десятки раз превышает их концентрации в промышленно перерабатываемом сырье. Это единственная гидроминеральная провинция мира с парагенезисом лития до 0.7 кг/м^3 и брома до 13.6 кг/м^3 . Известны фонтанировавшие скважины с дебитом рассола до 5–7 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$, с выносом на поверхность до 10 т хлорида лития и до 70 т брома в сутки [1].

Немного о Человеке. Евгений Викторович, несмотря на внешнюю суровость, был добрым человеком. Вспоминаю о встрече в 1983 г. во Фрайберге во время моей научной стажировки во Фрайбергской горной академии. Он прилетел оппонировать диссертацию и прочесть лекции. Долго с проф. Иорданом встречали в аэропорту Дрездена, но самолет посадили в Берлине. Вычислили время приезда и встретили на вокзале. Потом поехали к Иордану, затем поздним вечером пошли в гостиницу. Вдруг Евгений Викторович начал собирать сухие цветы. Подойдя к гостинице, он встал на крыльцо и вложил букет чертополоха в руки горняку (рисунок). Сказал, что это традиция. За время его пребывания мы практически не расставались, много ездили по Германии, общались на разные темы и мне удалось открыть для себя моего Учителя с неожиданной стороны. Глубоко сожалею, что эту доброту не разглядел раньше. Впоследствии, приезжая во Фрайберг, я выполнял эту традицию, но в последний приезд статуи уже не было. Время избирательно и беспристрастно. Все проходит...



Во Фрайберге (ГДР) у памятника горняку, 1983 г.

Список литературы

1. Вахромеев А.Г. Месторождения промышленных поликомпонентных рассолов глубоких горизонтов гидроминеральной провинции Сибирской платформы // Вестник ИрГТУ. 2014. №9(92). С. 73–78.
2. Евгений Викторович Пиннекер / под ред. Е.В. Склярова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 245 с.
3. Ломоносов И.С., Пиннекер Е.В., Ткачук В.Г. [Ред.] Минеральные воды Восточной Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 150 с.
4. Минеральные воды южной части Восточной Сибири / Под общ. ред. В.Г. Ткачук и Н.И. Толстихина. – М., Л. : Изд-во Акад. наук СССР, Ленингр. отд-ние, 1961–1962. 2 т.
5. Пиннекер Е.В. Человеческие минеральные источники (бассейн р. Витима) // Материалы по геологии и полезным ископаемым Иркутской области. Вып. 1. 1961. С. 145–150.
6. Пиннекер Е.В. Своеобразный минеральный источник // Природа, 1961, № 11. 113 с.
7. Подземные воды Иркутской области и их народнохозяйственное значение [Текст] / В.Г. Ткачук, Е.В. Пиннекер; Акад. наук СССР. Сиб. отд-ние. Вост.-Сиб. геол. ин-т. – Иркутск : Кн. изд-во, 1959. 111 с.

CHINA WATER SECURITY ISSUE IN A CHANGING WORLD: OPPORTUNITY & CHALLENGES

Xia J.^{1,2}, Xue Y.²

¹*State Key Laboratory of Water Resources Engineering & Operation; Research Institute for Water Security (RIWS), Wuhan University, Wuhan, China;*

²*Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China
xiajun666@whu.edu.cn*

Аннотация. Водная безопасность является одной из главных проблем современного общества. В данном докладе будут рассмотрены эффективные стратегии управления водными ресурсами в быстро меняющемся мире, сталкиваемом с многочисленными континентальными и глобальными проблемами, связанными с глобальным потеплением и освоением трансграничных бассейнов. Особое внимание в докладе будет уделено Китаю и обсуждению значения этого опыта для всего мира. Ключевые моменты охватывают стратегии повышения водной безопасности и потенциальные решения для устойчивого использования водных ресурсов для Целей устойчивого развития (ЦУР), особенно ЦУР 6 (чистая вода и санитария) и ее взаимосвязи со всеми другими ЦУР. Китай принял адаптивные меры для реализации ЦУР 6, направленные на достижение водной безопасности. Эти меры включают значительные институциональные изменения, такие как Закон об охране р. Янцзы и др., а также достижения в области науки и техники, например разработку симулятора р. Янцзы (YRS) и др., которые могут быть приняты во внимание странами по всему миру, сталкивающимися с аналогичными Китаю проблемами.

Ключевые слова: водная безопасность, изменение климата, стратегии управления водными ресурсами, цели устойчивого развития

Abstract. Water security is one of the major challenges in our society. This presentation will address effective water management strategies in a rapidly changing world, confronting many continental and global issues related to global warming and transboundary basin development. The presentation will a particular focus on China and discuss implications for the world. The key points cover strategies for enhancing water security and potential solutions for sustainable water resource utilization to achieve the Sustainable Development Goals (SDGs), especially SDG6 (i.e., SDG- Water and Sanitation) and its interconnection with all other SDGs. China has adopted adaptive measures to implement SDG 6, aiming for Water Security. These measures encompass significant institutional changes, such as Yangtze River Protection Law etc., and advancements in science and technology, such as development of Yangtze River Simulator (YRS) etc., which can be considered by countries worldwide which share similar challenges with China.

Keywords: water security, climate change, water management strategies, sustainable development goals

The world is facing unprecedented challenges, with a global and regional water crisis posing a significant threat to the security, stability, and environmental sustainability of nearly all nations. This crisis particularly impacts those in the developing world, affecting drinking water, agricultural water, urban water, and ecosystem water. Current data indicate that 2.5 billion people, almost 40 % of the world's grain production and nearly a quarter of the global economy are at risk due to non-sustainable water use, and these risks are projected to intensify towards 2050 [1].

Water stress and its impact on water supply, extreme climate events such as floods and droughts, poor water quality due to escalating pollution, and loss of biodiversity are interconnected challenges that necessitate sustainable solutions [7]. Consequently, water security has emerged as an urgent global issue. It is defined as the ability of a population to ensure sustainable access to adequate quantities of water of acceptable quality for sustaining livelihoods, human well-being, and socio-economic development, while ensuring protection against water-related disasters and preserving ecosystems in a climate of peace and political stability [6].

China presents a unique case in addressing water security. First, it faces a shortage of arable land and water resources due to their spatially unmatched distribution (Table). In North China, arable land accounts for 64 % with 47 % of the population and 45 % of GDP, but water resources account for only 19 %; in South China, water resources reach 81 % while arable land accounts for 31 %. Second, along with socio-economic development, China's water resources face increasing stress, making it necessary to control the red line of total actual water use within about 700 BCM in the future. Third, climate change enhances water stress in climate-vulnerable regions and increases disaster risk, especially with extreme floods and droughts [8]. Meanwhile, rapid urbanization and

land use and cover change (LUCC) present new challenges for managing water wisely, with increasing urban waterlogging, non-point source pollution and eco-water issues in major basins [11, 12, 15]. Thus, water security has become one of the most important issues for sustainable development in China.

Spatially unmatched distribution of the arable land and water resources in China.

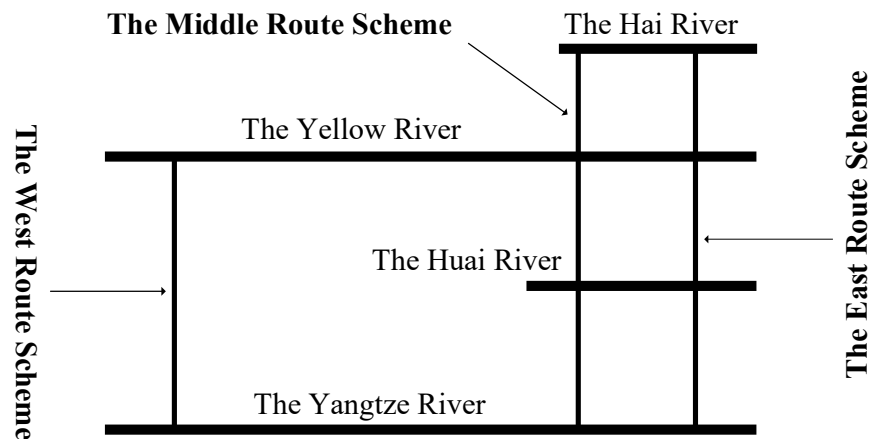
Indicators	North China	South China
Water Resources	19 %	81 %
Arable land	64 %	35 %
Population	47 %	53 %
Gross domestic product (GDP)	45 %	55 %

Water is central to all our development goals. The Chinese government, particularly the Ministry of Water Resources and other sectors, has undertaken actions on water strategies and policies, water governance, and innovations in science and technology [5]. Two examples are provided.

(1) Implementing the Strictest Water Resource Management since 2012. Also known as the “Three Red Lines” policy, it sets goals for total water use control, water-use efficiency, and water quality management. The first red line targets total water use, planning to keep consumption below 700 BCM by 2030; the second focuses on improving water-use efficiency and developing a water-saving society (with irrigation efficiency targets); the third emphasizes controlling wastewater discharge. Over the past decade, China’s water policy has transitioned from traditional water supply management to water demand management, and since 2021 total water use has been controlled within about 610 BCM. Using 6 % of the world’s freshwater resources, China sustains nearly 20 % of the world’s population and contributes more than 18 % of global economic output [16, 17].

(2) National Water Strategy in the New Era. In 2021, President Xi Jinping, on behalf of the Chinese government, proposed the national water strategies, namely, “Water saving priority, Regional balance, Systematic governance, and Two-handed efforts of both government role & market mechanism” [4]. Spatial equilibrium has been planned and implemented, including the South-to-North Water Diversion Project (SNWDP) with three routes (Figure). The SNWDP is part of China’s National Water Network Project, aiming to implement water spatial allocation for integrated water resources management. Since operation, the project has benefited North China in domestic, industrial, and agricultural use and helped address groundwater over-extraction. In parallel, China has strengthened water governance through laws and institutions, including China’s Water Law, the Yangtze River Protection Law (2020), the Yellow River Protection Law (2022), and the River/Lake Chief System (2016). These developing strategies and institutional innovations have enhanced the vitality and impetus of sustainable water resources utilization in a changing world [2, 10].

In contemporary China, innovation in science and technology has been emphasized to address pressures from global changes, socio-economic development needs and environmental protection. A river basin is a fundamental natural unit interconnected with water, soil, air, ecology and society, and hydrological science is shifting from traditional physical hydrology to water systems science and technology integrating natural hydrology, social hydrology, and systems sciences [9]. Applying systems science involves understanding interactions and feedback between hydrology and society, constructing multi-source monitoring systems, developing integrated modelling systems, and facilitating systematic decision-making for integrated water planning and management.



Schematic diagram of the South-to-North Water Diversion Project (SNWDP) in China.

Based on water systems science and applied technology, China is developing the Yangtze River Simulator (YRS), leveraging the technology of the digital twin basin [13]. The YRS has two pillars: an observation system and multi-scale modelling for applications. With advances in satellite systems and AI, monitoring now covers air-, space- and ground-based networks and enables real-time acquisition of spatiotemporal data. The aim is to achieve smart management of the Yangtze River through an integrated system that supports water utilization, biodiversity and eco-environment protection, climate change adaptation and sustainable development. Since 2019, YRS Version I has been developed and applied to predictions for the major floods in 2020 and the extreme drought in 2022, and to integrated water management in the basin. Based on YRS, urban system modelling has also been developed to support sponge city construction [3, 14].

In this presentation, I share experiences and perspectives from China and outline their implications for the world. The key points are as follows:

- (1) China has implemented adaptive measures to achieve SDG 6-water security-through substantial institutional changes and advancements in science and technology.
- (2) Countries around the world face issues similar to those in China, and share many continental and global problems related to global warming and transboundary basin development.
- (3) The world requires joint, rapid adaptive actions, especially through coordination of international organizations such as the IWRA. Chinese water managers and scientists will continue to cooperate with international water communities to implement the SDGs for sustainable water resources management in China and globally.

References

1. Braga B., Chartres C., Cosgrove A., Cunha L.V., Gleick, P.H., Kabat P., Kadi M.A., Loucks D.P., Lundqvist J., Narain S., Xia J. Water and the future of Humanity – Revisiting water security, Calouste Gulbenkian Foundation. Springer Press. 2014.
2. Hong S., Xia J., Chen J., Wan L., Ning L., Shi W. Multi-object approach and its application to adaptive water management under climate change. *Journal of Geographical Sciences*. 2017. 27(3). 259–274.
3. Hu C., Xia J., She D., Song Z., Zhang Y., Hong S. A new urban hydrological model considering various land covers for flood simulation // *Journal of Hydrology*. 2021. 603. 126833.
4. Lin Z. Conscientiously implement the water control ideas of ‘Water saving priority, regional balance, systematic governance, two-handed efforts of both government role & market mechanism’ to accelerate the high-quality development of hydrology [in Chinese] // *Water Resources Development Research*. 2021. 21(7), 38–42.
5. Shah W.U.H., Lu Y., Hao G., Yan H., Yasmeen R. Impact of “Three Red Lines” Water Policy (2011) on water usage efficiency, production technology heterogeneity, and determinant of water productivity change in China // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. 19(24). 16459.
6. UN Water. (2013). Water security and the global water agenda. <https://collections.unu.edu/eserv/UNU:2651/Water-Security-and-the-Global-Water-Agenda.pdf>.
7. Vörösmarty C.J., McIntyre P.B., Gessner M.O., Dudgeon D., Prusevich A., Green P., Glidden S., Bunn S.E., Sullivan C.A., Reidy Liermann C., Davies P.M. Global threats to human water security and river biodiversity // *Nature*. 2010. 467(7315). 555–561.

8. Xia J. (Climate change impact on water security & adaptive management in China. Guest Editors for the Special Issue // *Water International*. 2012. 37(5). 509–610.
9. Xia J. Toward water systems science and technology, Viewpoint on The frontiers of water and sanitation // *Nature-Water*. 2023. 1. 10–18.
10. Xia J. Climate change impacts on water resources and adaptive water policy: case studies in the east monsoon area of China // *Water International*. 2025. 50(8). 913–921.
11. Xia J., Chen J. A new era of flood control strategies from the perspective of managing the 2020 Yangtze River flood // *Science China Earth Sciences*. 2021. 64(1). 1-9.
12. Xia J., Li Z., Zeng S., Zou L., She D., Cheng D. Perspectives on eco-water security and sustainable development in the Yangtze River Basin // *Geoscience Letters*. 2021. 8(1). 18.
13. Xia J., Zhan C.S., Zou L., She D.X., Zuo Q.T. Theoretical method and practical exploration of Yangtze River Simulator construction // *Journal of Hydraulic Engineering*. 2022. 53(5). 505–514.
14. Xia J., Zhang Y.Y., She D.X., Zhang S.Y., Yang J., Lv M.Q., Zhang X., Luo A.Q., Wu S.J., Liu Y. Urban water system theory and its model development and application // *Science China: Earth Sciences*. 2023.
15. Xia J., Zhang Y., Xiong L., He S., Wang L., Yu Z. Opportunities and challenges of the Sponge City construction related to urban water issues in China // *Science China Earth Sciences*. 2017. 60(4). 652–658.
16. Zhang Y., Chen K., Zhu T. Regional and sectoral impacts of water redline policy in China: Results from an integrated regional CGE water model // *International Association of Agricultural Economists*. 2018. 18. 277509.
17. Zuo Q., Jin R., Ma J., Cui G. China pursues a strict water resources management system // *Environmental Earth Sciences*. 2014. 72(6). 2219–2222.

II. ГИДРОХИМИЯ, ИЗОТОПИЯ, МИКРОБИОЛОГИЯ ПОДЗЕМНОЙ ГИДРОСФЕРЫ

ГЕОХИМИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ УГЛЕКИСЛЫХ СУБТЕРМАЛЬНЫХ ВОД КАЛАРСКОГО ХРЕБТА (БАЙКАЛЬСКАЯ РИФТОВАЯ ЗОНА)

Брагин И.В., Павлов А.А., Александров И.А.

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, bragin_ivan@mail.ru

Аннотация. Проведено комплексное геохимическое исследование углекислых субтермальных и холодных минеральных источников северного склона Каларского хребта (северо-восточное обрамление Байкальской рифтовой системы). В результате полевых работ 2025 г. детально описаны три группы источников (Плотинный, Травертиновый, Золотой Каскад) и фоновые водотоки. Установлены их основные физико-химические параметры (Т, рН, Eh, минерализация) и химические типы вод (преимущественно гидрокарбонатный магниевый-кальциевый-натриевый). Методом ICP-MS определен широкий спектр микроэлементов (Li, Rb, Sr, Ba, PЗЭ, U и др.). На основе расчета коэффициентов водной миграции (K_x) впервые выделены группы элементов с принципиально разным миграционным поведением в углекислой среде: высокоподвижные (Li, Rb, Sr, Ba, B, Cs), слабоподвижные (PЗЭ, Y, Zr, Hf, Th) и элементы с аномальной подвижностью (U, Mo, Cd). Полученные данные свидетельствуют о том, что гидротермальный флюид селективно выщелачивает узкую группу литофильных катионов, в то время как травертинизация и сорбция служат мощным геохимическим барьером для высоковалентных элементов. Результаты вносят вклад в понимание механизмов формирования углекислых термальных вод в условиях континентального рифтогенеза.

Ключевые слова: *углекислые термальные воды, Каларский хребет, Байкальская рифтовая зона, геохимия микроэлементов, коэффициенты миграции*

Abstract. A comprehensive geochemical study of carbon dioxide subthermal and cold mineral springs of the northern slope of the Kalarsky range (northeastern rim of the Baikal rift system) has been carried out. As a result of field work in 2025, three groups of sources (Plotinny, Travertinovi, Golden Cascade) and background watercourses are described in detail. Their basic physico-chemical parameters (T, pH, Eh, mineralization) and chemical types of waters (mainly $\text{HCO}_3\text{-Mg-Ca-Na}$) have been established. The ICP-MS method determined a wide range of trace elements (Li, Rb, Sr, Ba, REE, U, etc.). Based on the calculation of the coefficients of elemental migration (K_x), groups of elements with fundamentally different migration behavior in a carbon dioxide environment are identified: highly mobile (Li, Rb, Sr, Ba, B, Cs), weakly mobile (REE, Y, Zr, Hf, Th) and elements with abnormal mobility (U, Mo, Cd). The data obtained indicate that hydrothermal fluid selectively leaches out a narrow group of lithophilic cations, while travertinization and sorption serve as a powerful geochemical barrier for highly valent elements. The results contribute to understanding the mechanisms of formation of carbon dioxide thermal waters under conditions of continental rifting.

Keywords: *CO₂-rich thermal waters, Kalarsky ridge, Baikal rift zone, geochemistry of trace elements, migration coefficients*

Разнообразие термальных источников на территории БРЗ определяется различными геодинамическими обстановками и литологией. Азотные термальные воды приурочены к разломным зонам, позволяющим атмогенным подземным водам циркулировать на глубинах, достаточных для их прогрева до высоких температур за счет термоградиента. При этом в кристаллических породах формируются воды в основном гидрокарбонатно-натриевого типа, а в осадочных – к анионному составу добавляются сульфаты. Из-за основных условий формирования (наличия глубоких разломов и развитой неотектоники) азотные термы получили практически повсеместное распространение на территории БРЗ. Углекислые термальные и субтермальные воды приурочены к областям проявления четвертичного вулканизма, связанного с рифтогенезом, поэтому воды формируются гидрокарбонатные со смешанным катионным составом. Вследствие ограниченного распространения четвертичного вулканизма углекислые термальные и субтермальные воды распространены лишь в пределах Восточных Саян, Тункинской впадины и Удоканского вулканического плато.

Исследование термоминеральных источников БРЗ тесно связано с именами таких известных гидрогеологов, как Е.В. Пиннекер, Н.И. Толстихин, А.И. Дзенс-Литовский, В.Г. Ткачук, А.М. Овчинников, И.С. Ломоносов и др. Они и заложили основу для современных

исследований в данной области. За последние годы получены новые данные по геохимии и условиям формирования азотных термальных вод БРЗ [2, 3, 4 и др.], при этом углекислые термальные воды остались без должного внимания, в основном в силу своей локализации, и существуют лишь единичные работы, посвященные этим объектам [1]. Однако изучение именно таких объектов может охватить междисциплинарную направленность по изучению магматических процессов в квартере. В связи с этим объектами данного исследования стали углекислые субтермальные и холодные минеральные источники северного склона Каларского хребта.

Представлены результаты работ по проекту Российского научного фонда «Механизмы формирования и источники вещества термальных вод различных геодинамических обстановок: Исследование на эталонных примерах современных обстановок Азии». Летом 2025 г. отрядом ДВГИ ДВО РАН была проведена комплексная экспедиция на территории Каларского хребта – региона, связанного с северо-восточным обрамлением Байкальской рифтовой системы. Этот отдаленный и труднодоступный район интересен развитием позднекайнозойского вулканизма (по данным некоторых исследователей последнее извержение происходило здесь чуть более 2 тыс. лет назад). Исследования были сосредоточены на изучении холодных и субтермальных углекислых вод, ассоциированных с ослабленными зонами субширотных разломов, пересекающих долины рек и ручьев: Эймнах, Плотинного, Травертинового и Инаричи. В результате комплексного анализа гидрогеологических и тектономагматических условий выявлены три основных группы термальных источников уникального состава: Плотинный (два участка): холодный и субтермальный, Травертиновый (три участка): все три субтермальных, Золотой Каскад (два участка): оба холодных.

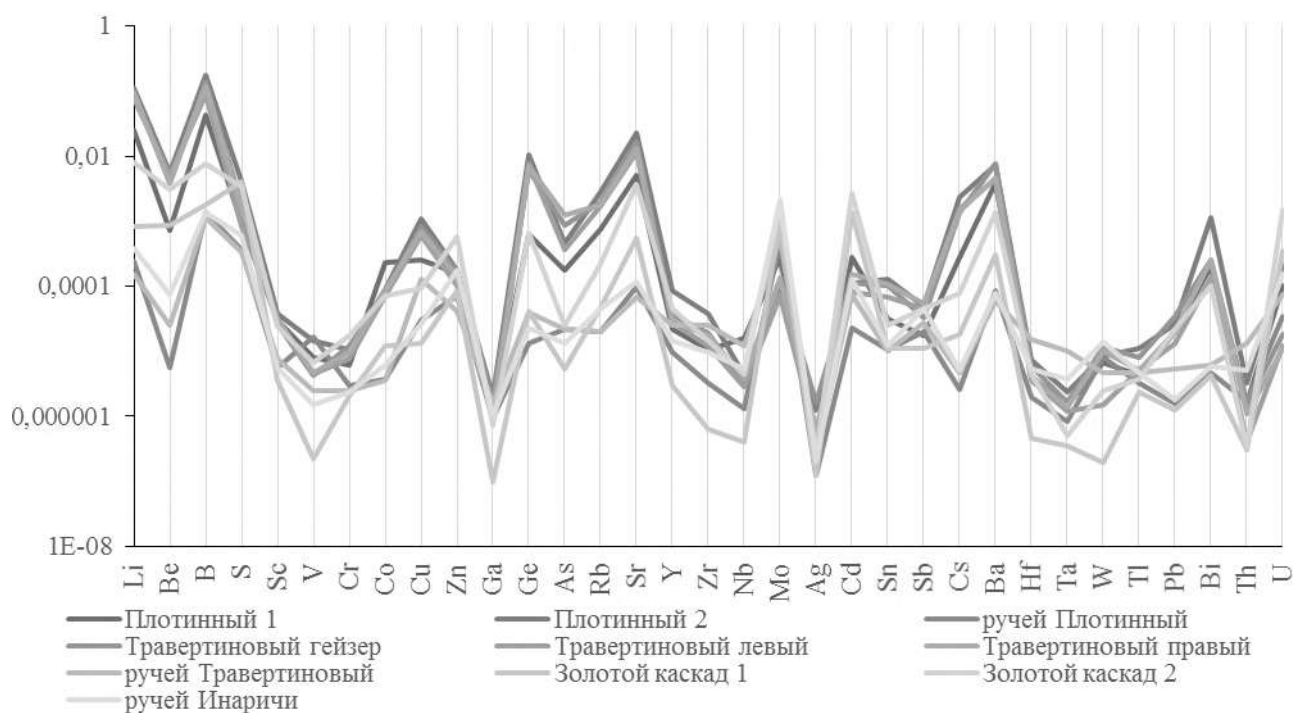
При проведении полевых работ непосредственно на месте пробоотбора производился замер нестабильных параметров воды: температуры, pH, Eh, TDS. Для сопоставления проводилось опробование фоновых поверхностных вод, отобранных выше по течению. Основные ионы определялись на жидкостном хроматографе Shimadzu LC-10; кремний – на атомно-эмиссионном спектрометре iCAP 7600 Duo; микроэлементы – на масс-спектрометре Agilent 7700x; общий и неорганический углерод – на анализаторе Shimadzu TOC-V. В указании химического типа вод элемент с большим его содержание в мг-экв/л ставится на последнее место.

Все группы источников относятся к разным типам вод (таблица). Так, холодный источник Плотинный принадлежит к гидрокарбонатному магниево-кальциево-натриевому типу, а его субтермальный сосед – к гидрокарбонатному кальциево-магниево-натриевому. Их минерализация различается в пять раз, а Eh холодного источника выше, что свидетельствует в пользу разбавления его холодными водами. Находящаяся в соседнем распадке руч. Травертинового одноименная группа источников относится уже к гидрокарбонатному магниево-кальциево-натриевому типу, имеет очень схожие параметры (pH, TDS, Eh), несмотря на географическую разобщенность выходов (около 100 м друг от друга). Это говорит о мощности «проработанной» неотектоникой проницаемой зоны, выводящей минеральные воды. Источник Золотой Каскад находится на удалении от предыдущих двух групп и географически привязан к самому молодому вулкану Чепе. Однако его состав и основные параметры (TDS, Eh, T) схожи с холодным источником Плотинным, но он относится к гидрокарбонатному натриево-магниево-кальциевому типу, обладая, соответственно, более низким pH. Различие в минерализации двух выходов источников Золотой Каскад является также следствием разбавления холодными подземными водами, что подтверждается разницей в pH, TDS и Eh.

Несмотря на различия в катионном составе (таблица), геохимия микроэлементов выявила единые закономерности. Для оценки поведения микроэлементов мы использовали коэффициент миграции (отношение содержания элемента в воде к таковому в верхней коре) (рисунок).

Основные характеристики исследованных объектов

Название	Координаты	T, °C	M, мг/дм ³	pH	Eh, мВ	Химический тип
Ист. Плотинный-1	N 56.22020, E 117.66858	6	1045	6.0	90	HCO ₃ -Mg-Ca-Na
Ист. Плотинный-2	N 56.22061, E 117.66911	15.9	5180	5.8	13	HCO ₃ -Ca-Mg-Na
Руч. Плотинный	N 56.22002, E 117.66895	8.7	47.1	3.7	126	HCO ₃ -Ca-Na-Mg
Ист. Травертиновый (гейзер)	N 56.22976, E 117.63848	14.8	4150	5.9	-20	HCO ₃ -Mg-Ca-Na
Ист. Травертиновый (левый)	N 56.23032, E 117.63864	18	3540	6.1	-24	HCO ₃ -Mg-Ca-Na
Ист. Травертиновый (правый)	N 56.23092, E 117.63833	17.3	3940	6.2	-26	HCO ₃ -Mg-Ca-Na
Руч. Травертиновый	N 56.22704, E 117.63712	10.5	47.5	6.1	51	HCO ₃ -Na-Mg-Ca
Ист. Золотой Каскад-1	N 56.21556, E 117.54658	4.4	219	5.0	133	HCO ₃ -Na-Mg-Ca
Ист. Золотой Каскад-2	N 56.21547, E 117.54685	6.6	1040	4.0	52	HCO ₃ -Na-Mg-Ca
Руч. Инаричи	N 56.21490, E 117.54751	5.7	82.4	5.4	30	HCO ₃ -Ca-Na-Mg



Коэффициенты миграции химических элементов в объектах исследования относительно верхней коры (UCC).

Среди определенных нами микроэлементов (от лития до урана) стоит выделить несколько групп элементов:

1) сильно подвижные (литий, рубидий, стронций, барий, цезий, бор), контролируемые образованием высокоподвижных бикарбонатных комплексов;

2) крайне слабо подвижные (практически все редкоземельные элементы, иттрий, галлий, цирконий, гафний, скандий, торий), контролируемые вторичным минералообразованием глин и карбонатов;

3) элементы с аномальным поведением (уран, молибден, кадмий, германий, медь и висмут), контролируемые литологическими особенностями вмещающих пород.

Гидротермальный флюид эффективно извлекает из пород лишь узкую группу литофильных элементов катионов с высокой ионной силой, а также рудных, в то время как подавляющее большинство элементов (особенно высоковалентные катионы) практически полностью остаются в твердой фазе. Травертинизация и сопутствующая сорбция служат мощным геохимическим барьером.

Таким образом, проведенные исследования позволили впервые получить детальную геохимическую характеристику ранее слабо изученных углекислых субтермальных и холодных источников Каларского хребта.

- Установлено, что все изученные источники являются гидрокарбонатными, но различаются по катионному составу и минерализации, что связано с различной степенью разбавления холодными водами и, вероятно, с особенностями водовмещающих пород.

- Геохимия микроэлементов выявила четкую селективность взаимодействия вода – вмещающая порода. Углекислый флюид эффективно извлекает из пород только литий, рубидий, стронций, барий, бор и цезий, в то время как редкоземельные элементы, цирконий, гафний, торий и скандий обладают крайне низкой миграционной способностью ($K_x \ll 1$) и задерживаются вторичными минералами. Аномальное поведение урана, молибдена и кадмия в отдельных пробах указывает на локальные окислительные условия или специфические литологические источники, требующие дальнейшего изучения.

Полученные данные о коэффициентах миграции (K_x) и паттернах распределения элементов могут служить геохимическим эталоном для идентификации и моделирования подобных углекислых гидротермальных систем в условиях континентального рифтогенеза. Работа обеспечивает основу для дальнейших изотопных (Sr, Li, C, O) и более детальных гидрогеологических исследований с целью точной идентификации источников флюида и тепла в этом уникальном районе.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 25-47-00153.

Список литературы

1. Оргильянов А.И., Замана Л.В., Михеев И.Е., Крюкова И.Г., Усманов М.Т., Пыряев А.Н. Азотные термы и углекислые воды Куанда-Эймнахского гидроминерального района (Северное Забайкалье) // География и природные ресурсы. 2021. № 3. С. 14–23. DOI: 10.15372/GIPR20210314.
2. Плюснин А.М., Замана Л.В., Шварцев С.Л., Токаренко О.Г., Чернявский М.К. Гидрогеохимические особенности состава азотных терм Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2013. № 54. С. 647–664.
3. Складов Е.В., Федоровский В.С., Складова О.А., Сковитина Т.М., Данилова Ю.В., Орлова Л.А., Ухова Н.Н. Гидротермальная активность в Байкальской рифтовой зоне: горячие источники и продукты отложения палеотерм // Доклады Академии наук. 2007. Т. 412. С. 257–261.
4. Zipra E.V., Ukrainstev A.V., Chernyavskii M.K., Fedorov I.A., Poturay V.A., Domrocheva E.V., Mukhortina N.A. Thermal waters in the central part of Baikal Rift Zone: Hydrogeochemistry and geothermometry (Republic of Buryatia, Russia) // Geothermics. 2025. Vol. 130, 103317 DOI: 10.1016/j.geothermics.2025.103317.

ПРИОРИТЕТНЫЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ПРЕДЕЛАХ СРЕДНЕОБСКОГО БАССЕЙНА

Вашурина М.В., Плавник А.Г., Гуляева Ю.В.

*Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН, Тюмень, bespalova_y@mail.ru*

Аннотация. Данное исследование посвящено анализу эволюции геохимического облика пресных подземных вод и выявлению закономерностей их изменчивости в пространстве и времени. Авторами систематизированы основные факторы гидрогеохимической дифференциации: геологическое строение водовмещающей среды, природно-климатические параметры и техногенная трансформация. На примере западной, центральной и восточной части Среднеобского бассейна стока подземных вод продемонстрирована специфика формирования качества вод под влиянием каждого из выделенных факторов, определяющих современное состояние подземной гидросферы региона. Особенности и закономерности пространственного изменения химического состава подземных вод горизонта обусловлены совместным действием вышеперечисленных факторов.

Ключевые слова: *химический состав, геологический фактор, природный фактор, техногенный фактор, тип вод*

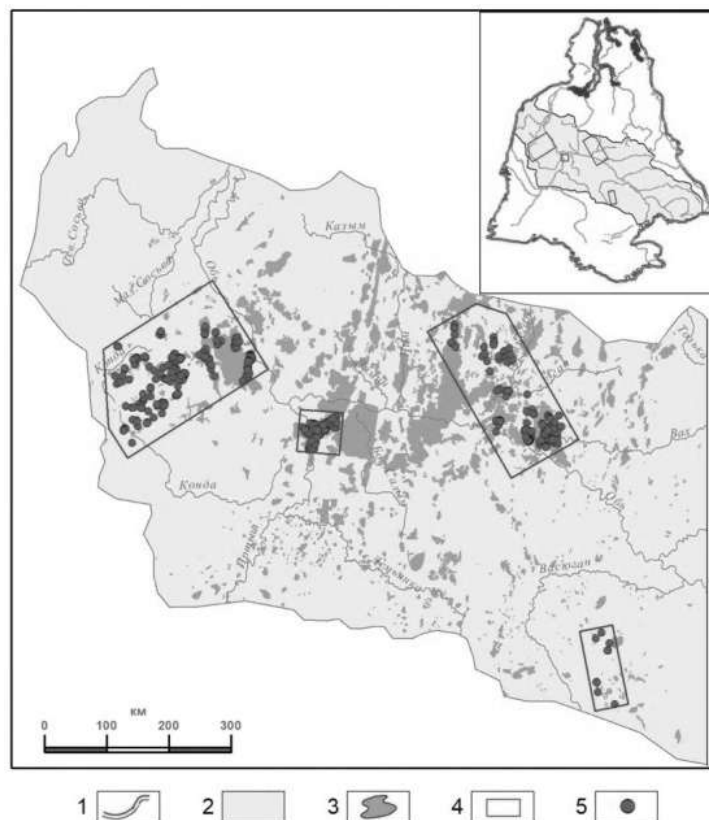
Abstract. This study analyzes the evolution of the geochemical profile of fresh groundwater and identifies patterns of its variability in space and time. The authors have systematized the main factors of hydrogeochemical differentiation: the geological structure of the water-bearing environment, natural and climatic parameters, and technogenic transformation. Using the example of the western, central and southern parts of the Middle Ob basin of groundwater runoff, the specifics of the formation of water quality under the influence of each of the identified factors determining the current state of the underground hydrosphere of the region are demonstrated. The features and patterns of spatial changes in the chemical composition of groundwater in the horizon are determined by the combined action of the above factors.

Keywords: *chemical composition, geological factor, natural factor, technogenic factor, water type*

В Западной Сибири пресные подземные воды (ППВ) выступают ключевым ресурсом как для хозяйственно-питьевого снабжения, так и для нужд нефтедобывающей отрасли (в частности, систем ППД). Основопологающим принципом недропользования в регионе является рациональное извлечение вод, направленное на сохранение естественного гидродинамического и гидрохимического баланса. Это позволяет избежать истощения запасов и деградации качества вод. Ведущим механизмом обеспечения данных условий и оперативного управления состоянием водоносных горизонтов является системный мониторинг [12]. Результаты многолетних наблюдений за гидрохимическим состоянием ППВ целевого атлым-новомихайловского водоносного горизонта, выполненные на водозаборных участках в пределах Среднеобского бассейна (рисунок), позволили выделить доминантные факторы, влияющие на формирование состава этих вод. Анализ гидрогеохимических данных выполнен на основе более трех тысяч химических анализов проб воды, полученных в процессе ежегодных опробований различными недропользователями 280 водозаборных скважин в период с 2015 по 2025 г. Химический анализ проб выполнен аккредитованной лабораторией физико-химических методов исследований ЗСФ ИНГГ СО РАН. Предельно допустимые концентрации (ПДК) проанализированы в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 «Санитарные правила и нормы. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Методы проведенных исследований заключаются в широко используемой ретроспективной оценке и сборе информации, ее анализе и систематизации, классификации, сопоставлении изменения значений макро- и микрокомпонентного состава ПВ, интерпретации полученных результатов.

Доминантный геологический фактор формирования рассматривается на примере участков западной части Среднеобского бассейна. Формирование гидрогеохимического облика ПВ определяется здесь в большей степени интенсивностью ионно-обменных процессов на глинистых сорбентах. Опираясь на фундаментальные исследования [4, 6, 7], авторы связывают состав катионного обмена монтмориллонитовых глин с палеогеографической обстановкой их осадконакопления.

Различия между морскими (Na-K) и континентальными (Ca-Mg) фациями обуславливают дифференциацию влияния водовмещающих пород на химизм современных ПВ [8]. Процессы ионного обмена Ca^{2+} , Mg^{2+} на $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, а HCO_3^- и SO_4^{2-} на Cl^- свойственны взаимодействиям ПВ и глинистых отложений (монтмориллонитов), а также соответствуют нисходящей вертикальной гидрогеохимической зональности для ПВ артезианских бассейнов, проявляющейся в росте содержания Cl^- и Na^+ с увеличением глубины интервала опробования.



Обзорная карта района исследования.

Геохимический анализ [10] показал преобладание процессов ионного обмена и гидролиза при взаимодействии вод с породами. Подстилающий глинистый водоупор тавдинской свиты активно участвует в формировании состава вод, сорбируя Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} и высвобождая в раствор $\text{Na}^+\text{+K}^+$, Cl^- . Установлено, что фильтрационные свойства и литологический состав надфильтровой толщи определяют зональность минерализации: наличие мощных глинистых экранов снижает концентрацию солей в олигоценовом горизонте, а увеличение доли песков – повышает.

атмосферных осадков с учетом времени их вертикальной миграции через олигоцен-четвертичную толщу обуславливает рост инфильтрационной составляющей питания ПВ. Несмотря на то, что текущий объем водоотбора незначителен относительно прогнозных ресурсов и не вызывает существенных депрессий пьезометрического уровня, наблюдается трансформация гидрохимического облика горизонта. В многолетнем цикле на большей части территории (в направлении с северо-востока на юго-запад) зафиксирована тенденция к снижению минерализации (сухого остатка) при одновременном росте перманганатной окисляемости (Арчинское, Урманское, Южно-Табаганское, Шингинское, Западно-Лугинецкое, Нижнелугинецкое месторождения). Данная динамика указывает на деминерализацию целевого водоносного горизонта и его обогащение органическим веществом. Установлено, что определяющим фактором данных изменений является рост атмосферного увлажнения, активизирующий приток инфильтрационных вод и подтягивание генетически связанных с ними болотных вод [2].

Доминантный техногенный фактор выделен для территории центральной части Среднеобского бассейна стока ПВ. Сравнительный анализ состояния ПВ на объектах интенсивной нефтедобычи (Самотлорское 2015–2021 гг., Талинское 2019–2025 гг., Приобское, южная часть месторождения, 2020–2025 гг.) выявил трансформацию структуры техногенной нагрузки (таблица).

Превышения ПДК показателей техногенного загрязнения на Самотлорском, Талинском и Приобском (южная часть) месторождениях нефти

Показатель	Самотлорское месторождение	Талинское месторождение	Приобское (южная часть) месторождение
нефтепродукты	2–6 ПДК	1.7–4.3 ПДК	1–10 ПДК
хлориды	1.2–3.2 ПДК	–	–
бромиды	1.8 ПДК	10 ПДК	10 ПДК
бор	1.2 ПДК	1–14.6 ПДК	–
нитриты	1.6 ПДК	–	–
алюминий	1–1.6 ПДК	–	–
натрий	1.59 ПДК	–	–
мышьяк	1.3–9 ПДК	–	–
никель	1 ПДК	–	–
свинец	2.1–7.5 ПДК	–	–

Сопоставление с данными 2018 г. [11] показало, что из ранее зафиксированных маркеров-загрязнителей стабильное присутствие сохраняют только нефтепродукты. При этом превышение в составе вод других микрокомпонентов (бор, алюминий, свинец, никель, мышьяк, натрий, нитриты) придает техногенному полю черты полиморфности и гетерогенности. Отсутствие устойчивых трендов к росту их концентраций и несистемный характер выявляемых аномалий указывают на локальный, вероятно, эпизодический генезис данных загрязнителей. Современный этап освоения нефтяных месторождений и интенсификация отбора подземных вод (ППВ) привели к существенной техногенной трансформации их химического состава. Наблюдается выраженная гидрохимическая инверсия: рост минерализации (сухого остатка) сопровождается деградацией концентраций гидрокарбонат-иона, кальция и магния при одновременном накоплении хлоридов и щелочных металлов ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$). Данные процессы обусловили переход от доминирующих гидрокарбонатных кальциево-магниевых вод к смешанным хлоридно-гидрокарбонатным натриевым типам. Прогнозное моделирование, выполненное для южной части Приобского месторождения, подтверждает прямую корреляцию между расширением эксплуатационного фонда скважин и падением пластового давления. Согласно расчетным данным, при достижении проектных мощностей водозаборов ожидается двукратное увеличение радиуса депрессионной воронки [3]. Влияние техногенного фактора на состояние ППВ, связанное с

формированием мульды оседания земной поверхности в результате нефтедобычи, подтверждается и на других месторождениях ЗСМБ [1].

Пространственная вариативность химического состава ПВ изучаемой территории обусловлена сложным взаимодействием геолого-структурных и антропогенных факторов. Ведущими детерминантами являются приуроченность горизонта к краевой зоне Западно-Сибирской плиты и техногенное нарушение гидрогеохимического равновесия при эксплуатации месторождений. Результаты анализа позволяют типизировать процессы изменения качества вод и разработать достоверные прогнозы их состояния на долгосрочную перспективу.

Список литературы

1. Васильев Ю.В., Иноземцев Д.П., Гудков А.В., Козырев В.И. Техногенное влияние добычи углеводородов на современные деформационные процессы Губкинского газового месторождения // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2025. № 4. С. 9–25. EDN:MPNFSW. DOI 10.31660/0445-0108-2025-4-9-25.
2. Вашурина М.В., Русакова Ю.О., Храмова А.Л. Макрокомпонентный состав пресных подземных вод в естественном и нарушенном состояниях в пределах территории Широтного Приобья // Нефтепромышленное дело. 2021.6 (630). С. 29–36. DOI: 10.33285/0207-2351-2021-6(630)-29-36.
3. Вашурина М.В., Русакова Ю.О., Храмова А.Л. Прогноз состояния пресных подземных вод в условиях интенсивного нефтяного освоения Западной Сибири. // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2018. (3). С. 7–13. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2018-3-7-13>.
4. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. / С.Р. Крайнов, Б.Н. Рыженко, В.М. Швец. Отв. Ред. Академик Н.П. Лаверов. М.: ЦентрЛитНефтегаз. 2012. 672 с.
5. Льготин В.А., Савичев О.Г., Макушин Ю.В., Камнева О.А. Многолетняя изменчивость химического состава подземных вод Томской области // География и природные ресурсы. 2012. № 1. С. 74–79.
6. Матусевич В.М. Гидрогеологические бассейны Западно-Сибирской равнины // 27-я сессия Международного геологического конгресса: Тезисы докладов. Т. 9. Ч. 2. М., 1984.
7. Посохов Е.В. Общая гидрогеохимия. Л.: Недра, 1975. 208 с.
8. Русакова Ю.О. Литологический состав пород как фактор влияния на химический состав подземных вод олигоценового горизонта в западной части Среднеобского гидрогеологического бассейна // Известия УГГУ. 2025. Вып. 3 (79). С. 49–62. DOI 10.21440/2307-2091-2025-3-49-62.
9. Савичев О.Г., Камнева О.А. Закономерности пространственных изменений химического состава подземных вод верхней гидродинамической зоны в Томской области (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317, № 1. С. 138–143.
10. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1998. 366 с.
11. Bespalova Yu.V., Popov V.K., Kuzevanov K.I., Trofimova N.S. Application of numerical modelling for evaluation of operating conditions of water intakes for domestic and drinking purposes in the area of oil fields operation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 181, №. 1, P. 012003. DOI 10.1088/1755-1315/181/1/012003.
12. Mazico Henry Ikwulemenze, Ifeanyichukwu Clinton Ezekwe, Enos Ihediohamma Emereibeole, Leonard Udochi Mgbeahuruike, Joseph Ikechukwu Nwachukwu Carcinogenic contaminants in groundwater in the Ebocha and Mgbede oil fields of Southern Nigeria // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/carcinogenic-contaminants-in-groundwater-in-the-ebocha-and-mgbede-oil-fields-of-southern-nigeria> (дата обращения: 24.12.2025).

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО КАК ИНДИКАТОР ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ КУЗБАССА

Домрочева Е.В., Король И.С., Мухортина Н.А.

Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Томск, DomrochevaYV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Проведено комплексное исследование состава и распределения органического вещества в природных водах Кузбасса. Методами ВЭЖХ и ГХ-МС установлено, что источники полиароматических углеводородов (ПАУ) имеют преимущественно пирогенное происхождение, связанное со сжиганием угля. Выявлена положительная корреляция между минерализацией вод и соотношением низко- и высокомолекулярных ПАУ. Фенантрен и флуорантен идентифицированы как универсальные маркеры техногенного воздействия. Состав *n*-алканов отражает вклад различных источников органического вещества. Полученные результаты демонстрируют возможность использования комплекса органических соединений в качестве надежных геохимических индикаторов для идентификации загрязнения и разработки системы экологического мониторинга в угледобывающих регионах.

Ключевые слова: органическое вещество, геохимические индикаторы, Кузбасс

Abstract. A comprehensive study of the composition and distribution of organic matter in the natural waters of Kuzbass was conducted. Using HPLC and GC-MS methods, it was established that the sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are predominantly of pyrogenic origin, associated with coal combustion. A positive correlation was revealed between water mineralization and the ratio of low- and high-molecular-weight PAHs. Phenanthrene and fluoranthene were identified as universal markers of technogenic impact. The composition of *n*-alkanes reflects the contribution of various sources of organic matter. The obtained results demonstrate the potential of using a complex of organic compounds as reliable geochemical indicators for identifying pollution and developing an environmental monitoring system in coal-mining regions.

Keywords: organic matter, geochemical indicators, Kuzbass

Кузнецкий угольный бассейн, являясь одним из крупнейших промышленных регионов России, характеризуется сложной экологической обстановкой, обусловленной интенсивной добычей и переработкой угля. Антропогенная деятельность приводит к поступлению в природные воды различных загрязняющих веществ, среди которых особое место занимают стойкие органические загрязнители, в частности полиароматические углеводороды (ПАУ). Эти соединения обладают выраженной токсичностью, некоторыми канцерогенными и мутагенными свойствами, что обуславливает их высокую экологическую опасность [1].

В то же время природные воды угленосных бассейнов изначально обогащены органическим веществом (ОВ) как за счет природных процессов (разложение растительности, взаимодействие с угольными пластами), так и в результате техногенного воздействия. Это делает актуальным исследование ОВ, включая ПАУ, в качестве геохимических индикаторов, позволяющих не только оценить уровень загрязнения, но и дифференцировать источники поступления веществ в водные системы – природные (петрогенные, биогенные) и техногенные (пирогенные).

Новизна данного исследования заключается в применении комплексного подхода, сочетающего определение индивидуального состава ПАУ и *n*-алканов с расчетом диагностических соотношений и геохимических индексов (CPI, TAR, Paq) для вод различного генезиса – от поверхностных до глубоких подземных вод зоны замедленного водообмена. Это позволило с новых позиций оценить вклад различных факторов в формирование химического состава природных вод и идентифицировать маркеры техногенного воздействия. В основу работы положены данные, полученные в ходе полевых исследований 2024–2025 гг., а также материалы предыдущих лет, накопленные в Томском филиале ИНГГ СО РАН [2, 3]. Всего проанализировано 89 проб воды, отобранных из поверхностных водотоков (реки, озера, пруды-отстойники) и подземных вод (родники, скважины, шахтные воды) центральных и южных районов Кузбасса.

Химический анализ воды включал определение основных макрокомпонентов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-), биогенных элементов, обобщенных показателей ОВ ($\text{C}_{\text{орг}}$, ХПК, БПК, ПО). Для анализа органических соединений применялись: 1) ВЭЖХ для

количественного определения 13 приоритетных ПАУ (нафталин, 2-метилнафталин, фенантрен, флуорантен, пирен, бенз(а)пирен и др.) с последующим расчетом диагностических соотношений (Flt/(Flt+Pyr), BaA/(BaA+Chr), Σ НМ/ Σ ВМ и др.) для идентификации их источников (пирогенные/петрогенные); 2) ГХ-МС для анализа *n*-алканов (C₁₅–C₃₂) с расчетом индексов CPI (Carbon Preference Index), TAR (Terrigenous/Aquatic Ratio) и Раq для оценки происхождения органического вещества. По результатам анализа имеющегося материала было установлено, что *поверхностные воды* в естественных условиях имеют низкую минерализацию (0.1–0.4 г/дм³) и HCO₃-Ca состав. Воды, смежные с промышленными территориями, характеризуются повышенной минерализацией (до 1.80 г/дм³ за счет роста концентраций Na⁺ и SO₄²⁻ (таблица)).

Усредненный химический состав и геохимические показатели природных вод Кузбасса

Элемент	Ед. изм.	Поверхностные воды		Подземные воды		
		Реки и озера	Реки и озера, смежные с промышленными территориями	Активный водообмен	Верхняя часть зоны замедленного водообмена	Нижняя часть замедленного водообмена
Ca ²⁺	мг/дм ³	<u>6–54</u> 20	<u>30–102</u> 56	<u>5–120</u> 63	<u>0.2–74</u> 43	<u>2.4–143</u> 29
Mg ²⁺		<u>1.8–12.5</u> 5.1	<u>17.1–64.0</u> 32.3	<u>1.2–30.5</u> 13.6	<u>1.2–16.5</u> 11.2	<u>1.6–79.3</u> 29.2
Na ⁺		<u>1.8–33</u> 7	<u>16–420</u> 182	<u>6.6–137</u> 52	<u>105–426</u> 229	<u>341–7230</u> 3741
K ⁺		<u>0.1–3.6</u> 0.7	<u>1.6–5.4</u> 2.8	<u>0.3–2.9</u> 1.0	<u>0.6–9.6</u> 4.4	<u>5.4–2016</u> 298.0
HCO ₃ ⁻		<u>22–273</u> 88	<u>268–1062</u> 614	<u>114–580</u> 365	<u>570–950</u> 774	<u>788–15494</u> 8035
SO ₄ ²⁻		<u>2.5–12.4</u> 6.7	<u>40.3–291.8</u> 124.4	<u>0.1–16.9</u> 6.4	<u>2.0–12.7</u> 6.4	<u>0.9–36.8</u> 6.8
Cl ⁻		<u>0.4–9.9</u> 2.2	<u>3.1–10.9</u> 5.6	<u>0.5–7</u> 4.9	<u>2.5–88.0</u> 26.3	<u>241–5 494</u> 1333
Мин.		<u>37.2–371</u> 136	<u>420–1833</u> 1 055	<u>171–769</u> 506	<u>780–1499</u> 1 116	<u>3 272–26602</u> 14 499
C _{орг}		<u>2.1–16.1</u> 5,9	<u>2.4–3.5</u> 2,8	<u>0.7–8.3</u> 3,5	<u>0.2–19.1</u> 9,5	<u>3.9–326</u> 123
рН		<u>6.8–9.9</u> 8,1	<u>8.0–8.5</u> 8,3	<u>7.0–9.0</u> 7,9	<u>7.1–8.3</u> 7,6	<u>7.2–8.9</u> 8,1
ОЖ	мг-э/дм ³	<u>0.5–3.6</u> 1.5	<u>3.7–10.4</u> 5.4	<u>0.4–7.8</u> 4.1	<u>0.1–4.8</u> 3.0	<u>0.3–8.1</u> 3.3
ПО	мг O ₂ /дм ³	<u>0.6–16.4</u> 4.2	<u>3.8–15.3</u> 8.3	<u>0.2–4.6</u> 1.0	<u>0.3–1.2</u> 0.7	<u>1.3–19.2</u> 5.2
ХПК		<u>3.9–28.8</u> 10.4	<u>8.4–54.1</u> 31.3	<u>3.5–11.7</u> 6.7	<u>4.9–19.0</u> 10.4	<u>5.0–161</u> 43.3
ΣПАУ	мкг/дм ³	<u>0.054–0.885</u> 0.346	<u>0.237–0.885</u> 0.381	<u>0.565–0.612</u> 0.589	<u>0.691–2.433</u> 1.562	<u>0.119–18.940</u> 1.923
ΣНМ		<u>0.014–0.506</u> 0.176	<u>0.102–0.506</u> 0.183	<u>0.204–0.282</u> 0.243	<u>0.206–1.612</u> 0.909	<u>0.001–10.540</u> 1.179
ΣВМ/ΣНМ		<u>0.041–0.378</u> 0.171	<u>0.116–0.404</u> 0.198	<u>0.330–0.361</u> 0.345	<u>0.484–0.821</u> 0.653	<u>0.038–8.399</u> 0.765
Количество анализов	шт.	19	6	36	5	23
CPI		<u>0.85–1.07</u> 0.91	<u>1.05–1.47</u> 1.26	<u>0.95–1.01</u> 0.98	<u>0.77–1.32</u> 1.05	<u>0.89–1.62</u> 1.11
TAR	%	<u>0.26–4.79</u> 2.1	<u>0.18–0.85</u> 0.43	<u>0.89–3.96</u> 2.43	<u>0.56–0.59</u> 0.58	<u>0.01–24.58</u> 9.32
Ra _q		<u>0.20–0.84</u> 0.51	<u>0.51–0.62</u> 0.57	<u>0.40–0.45</u> 0.42	<u>0.45–0.68</u> 0.57	<u>0.32–0.94</u> 0.66
Количество анализов	шт.	5	3	2	2	5

Примечание. В числителе – минимальное/максимальное значение, в знаменателе – среднее, ПО – перманганатная окисляемость, ХПК – химическое потребление кислорода, C_{орг} – органический углерод, ΣПАУ – сумма ПАУ, ΣНМ – сумма НМ соединений, ΣВМ – сумма ВМ соединений.

Подземные воды района подчиняются вертикальной гидрогеохимической зональности. Зона активного водообмена (глубина до 200–400 м): воды четвертичных, юрских и триасовых отложений с минерализацией 0.3–0.8 г/дм³. Верхняя часть зоны замедленного водообмена (до 600–700 м): воды пермских угленосных и триасовых отложений. Нижняя часть зоны замедленного водообмена (до 1200 м): воды пермских угленосных отложений. Для этих зон характерно увеличение минерализации до 3.3–26.6 г/дм³ и изменение состава воды на гидрокарбонатно-натриевый (содовый) и хлоридный типы.

Содержание органического углерода ($C_{орг}$) увеличивается с глубиной: от 0.7–8.0 мг/дм³ в зоне активного водообмена до 3.9–326 мг/дм³ в нижней части зоны замедленного водообмена. Аналогичный рост наблюдается для ХПК и ПО, что свидетельствует об увеличении доли трудноокисляемых органических соединений в глубоких водах, что может быть связано с влиянием угольных пластов.

Суммарное содержание ПАУ (ΣПАУ) варьируется в широких пределах: от 0.565–0.612 мкг/дм³ в зоне активного водообмена до 0.119–18.940 мкг/дм³ в глубоких подземных водах. Наибольшие концентрации отмечены в поверхностных водах, прилегающих к промышленным зонам, и в шахтных водах.

Расчет диагностических соотношений показал преобладание пирогенных источников ПАУ для большинства проб (таблица):

- Соотношение $Flt/(Flt+Pyr) > 0.5$ (0.66–1.00) указывает на сжигание угля или биомассы.

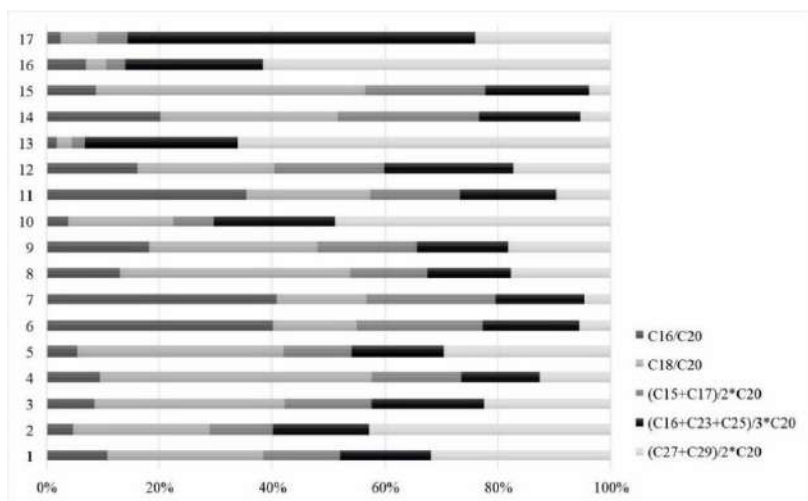
- Соотношение $BaA/(BaA+Chr) > 0.35$ (0.4–1.0) также подтверждает пирогенный источник.

- Соотношение $(Flt+Pyr)/(Phen+Chr) > 0.5$ для большинства проб (кроме некоторых поверхностных нагруженных вод) также свидетельствует в пользу пирогенеза.

Таким образом, основными источниками ПАУ в водах Кузбасса являются процессы высокотемпературного неполного сгорания органического вещества (уголь, жидкое топливо, древесина), а не нефтяное загрязнение (петрогенный источник). Индекс техногенности $(BaP+Pyr)/(Phen+Chr)$ во всех пробах был <1 (0.06–0.38), что позволяет отнести исследуемые воды к категории слабозагрязненных по ПАУ. Важным результатом является идентификация фенантрена и флуорантена как универсальных и устойчивых маркеров загрязнения, обнаруживаемых во всех типах вод. Их совместное присутствие и характер распределения надежно указывают на техногенное воздействие. Анализ *n*-алканов показал неоднородность источников ОБ в водах Кузбасса. Значения CPI варьируются от 0.62 до 1.62. Значения, близкие к 1, в некоторых пробах поверхностных и подземных вод могут указывать на возможное нефтяное загрязнение или влияние высококипящих нефтяных фракций.

Индексы TAR (от 0.09 до 24.58) и Paq (от 0.20 до 0.94) позволили дифференцировать вклад различной органики (рисунок). Преобладание высокомолекулярных *n*-алканов (C_{27} , C_{29} , C_{31}) и высокие значения TAR в некоторых глубоких подземных водах (пробы №13, 16) указывают на значительный вклад наземной растительности. Повышенные значения индекса Paq в ряде проб свидетельствуют о заметном вкладе водных макрофитов и сфагновых мхов. Доминирование низкомолекулярных гомологов ($<C_{21}$) в некоторых поверхностных водах и водах активного водообмена связано с веществом фитопланктона и бактерий.

Была выявлена положительная корреляционная связь между общей минерализацией вод и соотношением $\Sigma HM\ PAU/\Sigma VM\ PAU$. Это указывает на сложные геохимические процессы трансформации органического вещества, которые по-разному протекают в поверхностных водах (где повышение соотношения связано с антропогенным воздействием) и в глубоких подземных водах (где оно обусловлено природными процессами в угленосных толщах). Проведенное комплексное исследование органического вещества в природных водах Кузбасса позволило получить новые данные, раскрывающие особенности его состава, распределения и трансформации в условиях природных и техногенно-нагруженных систем.



Состав органического вещества в пробах природных вод Кузбасса, % отн.

Поверхностные воды: пробы 1–5 – природные, 6–8 – антропогенно нагруженные. Подземные воды: пробы 9–10 – зоны активного водообмена, 11–12 – верхней зоны замедленного водообмена, 13–17 – нижней зоны замедленного водообмена. ОВ: C_{16}/C_{20} – гетеротрофы, C_{18}/C_{20} – пурпурные бактерии, $(C_{15}+C_{17})/2 \cdot C_{20}$ – фитопланктон, $(C_{16}+C_{23}+C_{25})/3 \cdot C_{20}$ – прибрежные водоросли, $(C_{27}+C_{29})/2 \cdot C_{20}$ – наземные растения.

1. Установлена вертикальная зональность в распределении как макрокомпонентов, так и органических соединений, отражающая изменение гидрогеохимических условий с глубиной.

2. Доказано преобладание пирогенных источников поступления ПАУ в воды региона, связанных со сжиганием угля и биомассы. Рассчитанные диагностические соотношения ПАУ являются эффективным инструментом для установления их источников.

3. Идентифицированы надежные маркеры техногенного воздействия – фенантрен и флуорантен, присутствующие во всех типах исследуемых вод.

4. Состав *n*-алканов и рассчитанные геохимические индексы (CPI, TAR, Paq) показали мозаичность источников исходного органического вещества, включая вклад наземной растительности, водной флоры.

5. Выявленная корреляция между минерализацией и соотношением НМ/ВМ ПАУ подчеркивает взаимосвязь между геохимической эволюцией вод и трансформацией растворенного органического вещества.

Полученные результаты обладают значительной научной новизной и практической ценностью, заключающейся в разработке комплексного геохимического подхода для идентификации источников загрязнения и оценки состояния водных ресурсов в угледобывающих регионах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00170, <https://rscf.ru/project/25-27-00170/>

Список литературы

1. Домрочева Е.В. Геохимическое состояние природных вод юга Кузбасса на примере Тутуянской площади // Международный научный конгресс «Интерэкспо ГЕО-Сибирь». Новосибирск, 2019. Т. 2, № 3. С. 239–245.
2. Исмагилов З.Р., Журавлева Н.В., Керженцев М.А. и др. Экологические проблемы Кузнецкого угольного бассейна. Научные подходы и технологии для снижения загрязнений окружающей среды // Химия в интересах устойчивого развития. 2018. Т. 26, № 3. С. 241–260.
3. Лепокурова О.Е., Домрочева Е.В. Гуминовые вещества в природных водах Нарыкско-Осташкинской площади (Кузбасс) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 3. С. 197–206.

ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ ПО ИЗОТОПНОМУ СОСТАВУ ХЛОРА ($\delta^{37}\text{Cl}$) В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ УГЛЕНОСНЫХ РАЙОНОВ КУЗБАССА

Дребот В.В.^{1,2}, Велюга Д.М.², Домрочева Е.В.¹

¹Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
СО РАН, Томск, DrebotVV@ipgg.sbras.ru

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

Аннотация. В работе впервые представлены данные об изотопном составе хлора ($\delta^{37}\text{Cl}$) в подземных водах угленосных отложений Нарыкско-Осташкинского района Кузбасса, который в настоящее время рассматривается как крупнейшая сырьевая база для добычи метана из угольных пластов. Полученный результат $\delta^{37}\text{Cl}$ находится на уровне -0.23‰ SMOC, что согласовывается с известными в настоящее время диапазонами значений вод со схожими химическими характеристиками. Результат сопоставим с изотопными вариациями, опубликованными для метановых флюидов угольных пластов бассейна Чероки в Канзасе (США). Работа положила начало изучению природы повышенных содержаний хлора в содовых водах Кузбасса, которая до настоящего времени оставалась неизученной, а также оценке связи этих содержаний с угленосными отложениями.

Ключевые слова: стабильные изотопы хлора, подземные воды, уголь, метан, Кузбасс

Abstract. This study presents the first data on the chlorine isotopic composition ($\delta^{37}\text{Cl}$) of groundwater in the coal-bearing deposits of the Naryk–Ostashkino area, Kuznetsk Basin, which is currently regarded as Russia's largest resource base for coalbed methane production. The measured $\delta^{37}\text{Cl}$ value of -0.23‰ (vs. SMOC) falls well within the published ranges for waters with similar chemical signatures and is comparable to isotopic variations reported for coalbed methane fluids in the Cherokee Basin, Kansas (USA). This work initiates the investigation into the origin of elevated chlorine concentrations in the soda waters of Kuzbass—a question that has remained unexplored until now—and provides a first assessment of their relationship with the host coal-bearing strata.

Keywords: stable chlorine isotopes, groundwater, coal, methane, Kuzbass

Определение источников поступления химических компонентов в подземные воды является одной из ключевых задач современной гидрогеохимии. Существенный прогресс в этой области был достигнут благодаря развитию в последние десятилетия изотопных методов исследования, предоставляющих принципиально новую информацию о происхождении элементов химического состава вод.

В качестве объекта изучения были выбраны подземные воды угленосных отложений Нарыкско-Осташкинского района Кузбасса, который в настоящее время рассматривается как крупнейшая сырьевая база для добычи метана из угольных пластов. Геохимия исследуемых вод уже была детально изучена коллективом авторов Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (ТФ ИНГГ СО РАН) [1–3], а также установлена природа их гидрокарбонатного натриевого (содового) состава, исследован изотопный состав воды, углерода и серы, дана оценка возраста воды [2]. Однако, наряду с гидрокарбонат-ионом, исследуемые воды также обогащены и хлор-ионом, происхождение повышенных содержаний которого все еще остается дискуссионным. В частности, профессором С.Л. Шварцевым и соавторами в 2007 г. была выдвинута гипотеза, согласно которой «эти содержания связаны с древними угольными пожарами, которые были широко распространены в этом регионе».

В рамках этой работы впервые для исследуемых подземных вод будут представлены уникальные данные об изотопном составе хлора ($\delta^{37}\text{Cl}$). В настоящее время его изучение является одним из наиболее современных геохимических инструментов, используемых при изучении механизмов и направленности формирования состава высокоминерализованных вод, что позволит расширить существующие в настоящее время представления об источниках поступления этого элемента в природные воды.

Подавляющая часть разреза Нарыкско-Осташкинской площади сложена в основном пермскими угленосно-терригенными отложениями ленинской (P_{2-3ln}), грамотеинской (P_{3gr}), тайлуганской (P_{3tl}) свит, представленных песчаниками, алевролитами и аргиллитами с включением угольных пластов. Выше по разрезу распространены триасовые безугольные

отложения мальцевской серии (T_{1-2ml}). Сверху коренные породы покрыты маломощными рыхлыми отложениями кайнозойского возраста, сложенными глинами, песчаниками и гравийно-галечниками. Нарыкско-Осташкинская площадь представляет собой брахисинклинальную структуру, осложненную тектоническими нарушениями.

В гидрогеологическом отношении разрез в районе исследований можно разделить на две неравномерные зоны интенсивного и замедленного водообмена – зону мощностью 140–180 м на водоразделах и 60–80 м в долинах рек, занимающую верхнюю часть разреза, сложенную рыхлыми мезокайнозойскими (преимущественно четвертичными) отложениями, и зону интенсивной трещиноватости коренных пород кольчугинской серии (весь нижележащий разрез. В первой зоне доминируют газы атмосферного и частично биохимического генезиса (O_2 , N_2 , CO_2), во второй – метан [3].

В данной работе изучается одна проба подземной воды, отобранная в пределах Нарыкско-Осташкинской площади Кузбасса с глубины 1200 м. $^{37}Cl/^{35}Cl$ измеряли относительно стандарта среднеокеанического хлорида (SMOC) с помощью масс-спектрометрии изотопных отношений при постоянном потоке (CF-IRMS) в сочетании с газовой хроматографией (GC) в канадской лаборатории Isotope Tracer Technologies Inc на приборах IsoPrime Micromass (Великобритания), Agilent 6890 (США) и CTC Analytics CombiPAL (Швейцария) согласно методике [5]. Результаты представлены в дельта-промилле (‰). Аналитическая точность анализа составляет ± 0.2 ‰.

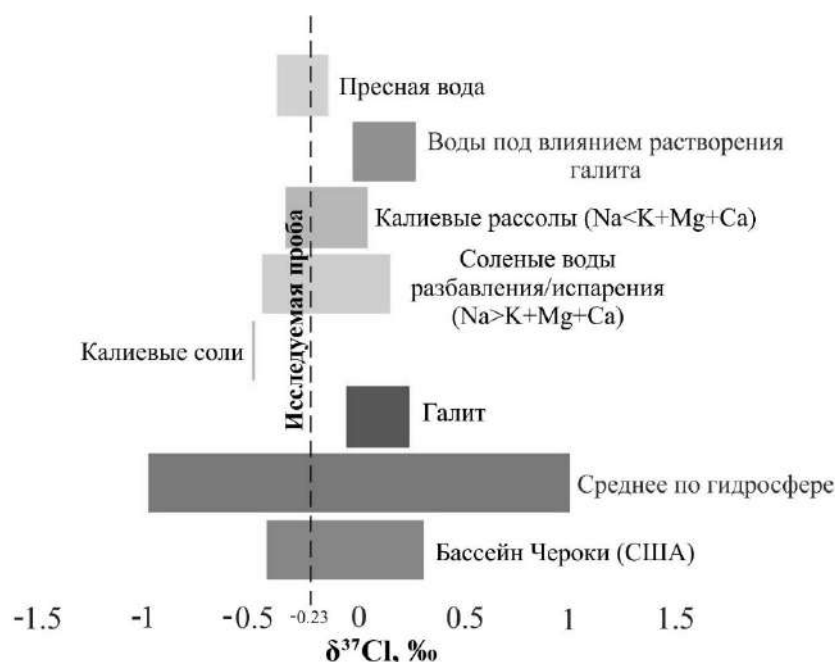
Кроме изотопного состава определялась температура, pH, Eh, общая минерализация, ионный состав, концентрации микрокомпонентов и органических веществ. Более детально анализ химического состава был показан в работах [1, 2]. Аналитические исследования проводились стандартными методами (титрование, масс-спектрометрия, фотометрия) в Томском политехническом университете и в ТФ ИНГГ СО РАН (г. Томск).

Среди катионов в составе исследуемых вод преобладающим является Na^+ с содержанием 4798 мг/дм³, среди анионов – HCO_3^- (10970 мг/дм³), а также Cl (695.3 мг/дм³). Согласно классификации С.Л. Шварцева воды являются слабосолеными с минерализацией 16.64 г/дм³ и щелочными с pH 8.9. По химическому типу воды гидрокарбонатные натриевые (содовые). Хлор в формулу ионно-солевого состава входит вторым:

$$M_{16,64} \frac{HCO_3 \ 90,02 \ Cl \ 10}{Na \ 97,58} \ pH \ 8,86.$$

Изотопный показатель хлора в исследуемой пробе воды находится на уровне -0.23 ‰ SMOC.

Для того чтобы разобраться в природе полученного значения $\delta^{37}Cl$ данные были сопоставлены со средними по гидросфере в разных типах вод, представленными в работе 2025 г. [4], которые были рассчитаны на основе опубликованных результатов по 721 образцу, отобранным по всему миру. Для сравнения выбраны: 1) воды с низким соотношением Br/Cl ($Br/Cl < 0,001$), которые формируются под влиянием растворения галита; 2) вода с высокими концентрациями K + Mg + Ca, которые представляют собой либо калиевые рассолы, из которых большая часть натрия была осаждена в виде галита, либо разбавленные пресной водой; 3) соленые воды с высокими концентрациями Na и Cl, которые представляют собой либо разбавленную, либо испаряющуюся воду; 4) пресные воды с содержанием хлора менее 1000 мг/дм³. Помимо этого, на график (рисунок) вынесен диапазон показателей $\delta^{37}Cl$ метановых флюидов угольных пластов бассейна Чероки (США), который представляет собой единственный подробный опубликованный на данный момент пример для угледобывающих регионов. Кроме того, для сравнения были использованы усредненные данные $\delta^{37}Cl$ в галите и калиевых солях (соли, осажденные на более поздних стадиях).



Известные вариации $\delta^{37}\text{Cl}$ в природных водах по данным [6] с нанесенным значением в точке опробования из Кузбасса.

Полученный нами показатель $\delta^{37}\text{Cl}$ укладывается в известный в настоящее время диапазон по гидросфере (от -1 до $+1$ ‰) (рисунок). Одновременно значение -0.23 ‰ попадает в рамки данных, опубликованных для пресных вод, а также находится в пределах известных вариаций для соленых вод, находящихся под влиянием разбавления/испарения. В целом стоит отметить, что исследуемые нами воды действительно представляют «нечто среднее» между описанными в [6] солеными с преобладанием Na и пресными с содержаниями Cl не более 1000 мг/дм^3 . Поскольку с одной стороны воды Кузбасса отличаются выраженным содовым составом, а с другой – концентрация хлора исследуемых вод ниже 1000 мг/дм^3 , это может подтверждать достоверность полученных результатов. Растворение галита как основного источника хлора также можно исключить, поскольку в этом случае ожидаются значительно более высокие показатели $\delta^{37}\text{Cl}$. Попадание в диапазон калиевых рассолов в данном случае, вероятнее всего, можно считать совпадением, поскольку изучаемые воды изначально сильно отличаются по составу от сравниваемых.

Одновременно полученный результат укладывается в диапазон, опубликованный для метановых флюидов угольных пластов бассейна Чероки [6]. В этой работе представлены очень высокие значения $\delta^{81}\text{Br}$ (выше $+2.0$ ‰ SMOB), в то время как значения $\delta^{37}\text{Cl}$ показывали гораздо более «нормальные» значения (около 0 ‰), что хорошо сопоставимо с нашим результатом из Кузбасса. Авторы [4] предположили, что полученные вариации $\delta^{37}\text{Cl}$ указывают на то, что на соленость вод Канзаса, помимо смешения, могут влиять другие неизвестные процессы, не связанные с испарением, растворением эвапоритов или диффузией. В частности, была выдвинута гипотеза, согласно которой взаимодействие с органически связанным бромом и растворимым хлором в угле может оказывать наиболее сильное влияние на полученные значения $\delta^{81}\text{Br}$ и $\delta^{37}\text{Cl}$ в бассейне Чероки, обуславливая относительно обогащенные вариации $\delta^{81}\text{Br}$ и «нормальные» показатели $\delta^{37}\text{Cl}$ в этих флюидах. Авторы обращают внимание на то, что для однозначных выводов о природе как хлора, так и брома, а также их стабильных изотопов в водах угольных бассейнов пока недостаточно данных и это требует дополнительных исследований.

Таким образом, в рамках данной работы представлены первые результаты изучения изотопного состава хлора ($\delta^{37}\text{Cl}$) в пробе подземных вод угленосного района Кузбасса. Показано, что полученный результат $\delta^{37}\text{Cl}$ находится на уровне -0.23 ‰ SMOC, что хорошо укладывается в пределы известных диапазонов $\delta^{37}\text{Cl}$ для натриевых природных вод с

повышенной соленостью и пресных вод с низким содержанием хлора. Кроме того, полученные данные сопоставимы с $\delta^{37}\text{Cl}$ метановых флюидов угольных пластов бассейна Чероки в Канзасе, в единственном опубликованном подробном исследовании вариаций стабильных изотопов хлора (и брома) в угледобывающих регионах. На данный момент объема приведенных данных пока недостаточно для того, чтобы подтвердить или опровергнуть выдвинутое при изучении бассейна Чероки предположение о том, что взаимодействие с органически связанным бромом и растворимым хлором в угле может оказывать наиболее сильное влияние на показатели $\delta^{81}\text{Br}$ и $\delta^{37}\text{Cl}$ природных вод регионов угледобычи. Тем не менее полученные результаты сопоставимы с опубликованными для вод со схожими химическими характеристиками. В дальнейшем нами планируется увеличить количество анализируемых проб и изучить $\delta^{81}\text{Br}$ подземных вод Кузбасса, а также $\delta^{37}\text{Cl}$ и $\delta^{81}\text{Br}$ водовмещающих пород, что поможет внести вклад в понимание эволюции химического состава природных вод в природно-техногенных условиях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25–27–00170, <https://rscf.ru/project/25–27–00170/>. Авторы благодарят коллектив лаборатории Isotope Tracer Technologies Inc за предоставленную возможность измерить изотопные отношения хлора.

Список литературы

1. Лепокурова О.Е. Содовые подземные воды юга Кузбасса: изотопно-химические особенности и условия формирования // Геохимия. 2018. № 9. С. 904–919.
2. Лепокурова О.Е., Домрочева Е.В. Изотопный состав природных вод Кузбасса на площадях добычи угольного метана // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. № 10. С. 71–86.
3. Шварцев С.Л., Хрюкин В.Т., Домрочева Е.В., Кузеванов К.И., Рассказов Н.М., Попова Т.С., Лепокурова О.Е., Швачко Е.В. Гидрогеология Ерунаковского района Кузбасса в связи с проблемой образования ресурсов и добычи угольного метана // Геология и геофизика. 2006. № 7. С. 881–891.
4. Eggenkamp H. The Geochemistry of Stable Chlorine and Bromine Isotopes. 2–е изд., Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. 311 с.
5. Shouakar-Stash O., Drimmie R.J., Frape S.K. Determination of inorganic chlorine stable isotopes by continuous flow isotope ratio mass spectrometry // Rapid Communications in Mass Spectrometry. 2005. Vol. 19, № 2. P. 121–127.
6. Stotler R.L. et al. Stable bromine isotopic composition of coal bed methane (Cbm) produced water, the occurrence of enriched $\delta^{81}\text{Br}$, and implications for fluid flow in the midcontinent, USA // Minerals. MDPI AG, 2021. Vol. 11, № 4.

МИКРОБНЫЕ СООБЩЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД КУЛТУКСКОГО РЕЗЕРВУАРА (ЮЖНЫЙ БАЙКАЛ)

Захаренко А.С.¹, Букин С.В.¹, Асламов И.А.¹, Сакирко М.В.¹, Чебыкин Е.П.²,
Рассказов С.В.^{2,3}, Земская Т.И.¹

¹Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, zakharenko@lin.irk.ru

²Институт земной коры СО РАН, Иркутск

³Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск

Аннотация. Впервые исследованы микробные сообщества в двух скважинах подземного резервуара на берегу озера Байкал, в осевой части Байкальской рифтовой зоны. Химический состав воды скважин характеризовался высокими концентрациями Ca^{2+} , Cl^- , Mg^{2+} , NO_3^- и SO_4^{2-} , превышающими значения в байкальской воде. В микробиомах скважин преобладали представители филумов *Pseudomonadota*, *Actinomycetota*, *Patescibacteria*, *Thermoproteota* и *Nanoarchaeota*. Микробное разнообразие подземного резервуара значительно отличалось от ближайших экотопов (водная толща и донные осадки озера Байкал, эстуарии малых рек южной части Байкала). Основными факторами окружающей среды, влияющими на микробные сообщества исследованных подземных вод, являлись концентрации биогенов ($p < 0.05$).

Ключевые слова: экосистема подземных вод, химический состав, микробное разнообразие, бактерии, археи, озеро Байкал

Abstract. For the first time, microbial communities were investigated in two wells tapping a groundwater reservoir at the Kultuk test site on the shore of Lake Baikal, within the axial part of the Baikal Rift Zone. The chemical composition of the well water was characterized by high concentrations of Ca^{2+} , Cl^- , Mg^{2+} , NO_3^- , and SO_4^{2-} , exceeding those found in Lake Baikal water. The microbial communities were dominated by members of the phyla *Pseudomonadota*, *Actinomycetota*, *Patescibacteria*, *Thermoproteota*, and *Nanoarchaeota*. The microbial diversity of the groundwater reservoir differed significantly from those in adjacent habitats (water column, bottom sediments of Lake Baikal, and river estuaries in the southern part of Lake Baikal). The structure of the groundwater microbial communities was primarily shaped by the concentrations of biogenic elements ($p < 0.05$).

Keywords: groundwater ecosystem, chemical composition, microbial diversity, Bacteria, Archaea, Lake Baikal

Байкальский регион с гидрогеологической точки зрения представляет собой один из наиболее сложных районов земной коры, имеющий множество подземных вод, формирование и состояние которых определяются тектонической активностью и наличием разломов [1]. Изучение микробного разнообразия подземных вод данного региона в основном касалось лишь горячих источников, находящихся в центральной и северной части Байкала, для которых характерны полиэкстремальные термофильные сообщества [4, 7, 8]. Резервуар подземных вод Култукский полигон расположен в Южно-Байкальской впадине и относится к неглубоким (<50 м ниже поверхности) недрам [6]. Нами представлена первая оценка разнообразия микробных сообществ и химического состава в двух скважинах (9 и 184) Култукского полигона, которые занимают разное положение в активных разломах и находятся на расстоянии 1624 м друг от друга [9]. На основе гидрохимического анализа и секвенирования гена 16S рРНК на платформе Illumina установлено, что воды скважин не были идентичны. Концентрации отдельных ионов, а также структура и разнообразие микробных сообществ значительно различались при сравнении с аналогичными данными в пелагиали и донных осадках оз. Байкал, а также эстуарных зон малых рек южной части Байкала. Для скважин характерны высокие концентрации ионов Ca^{2+} , Cl^- , Mg^{2+} , NO_3^- и SO_4^{2-} , превышающие значения в байкальской воде [5]. Наиболее высокие значения суммы ионов и концентраций биогенных элементов зарегистрированы в скважине 184. Основной вклад в бактериальные сообщества скважин вносили бактерии филумов *Pseudomonadota* и *Actinomycetota*. Среди архей наиболее широко представлены филумы *Thermoproteota* и *Nanoarchaeota*, характерные для сообществ донных отложений оз. Байкал. Кроме того, в сообществе скважины 184 значимую долю составляли представители филума *Thermoplasmata*. Каждая скважина демонстрировала индивидуальный профиль микробного сообщества на уровне рода, с наибольшим разнообразием в скважине 184. Микробиомы состояли из аэробных, микроаэрофильных и анаэробных организмов, способных получать энергию путем окисления или восстановления неорганических субстратов, таких как нитрат или сульфат, а также

органического вещества. Учитывая наличие высоких концентраций нитрат-ионов в воде скважин и достоверную положительную корреляцию многих таксонов с этим ионом, можно предполагать значимую роль азотного цикла в микробном метаболизме, что отмечалось и для водной толщи и донных отложений оз. Байкал [2, 3]. Вода каждой из изученных скважин характеризовалась уникальным микробным сообществом, адаптированным к специфическим условиям среды, но при этом связанным с другими экосистемами посредством поступления флюидов и глубинной биосферы из подземной осадочной толщи.

Постоянный мониторинг и анализ могут дать представление о реакции микроорганизмов на изменяющиеся условия окружающей среды в подземных водах Байкальской рифтовой зоны, способствуя природоохранным мероприятиям и расширяя наши современные знания о функционировании микробных экосистем подземных вод.

Исследования выполнены в рамках госзаданий ЛИН СО РАН: № FWSR-2026-0011 (1025031800035-4-1.5.1) – микробиологические, № FWSR-2026-0009 (1023032700323-4-1.5.12) – гидрохимические.

Список литературы

1. Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Ломоносов И.С., Колдышева Р.Я., Диденко А.А., Шерман С.И. Гидрогеология Прибайкалья. М.: Наука, 1968. 170 с.
2. Bukin S.V., Lomakina A.V., Rusanov I.I., Ivanov V.G., Pogodaeva T.V., Kolesnikov P.M., Shubenkova O.V., Zakharenko A.S., Bukin Yu.S., Rodriguez-Valera F., Zemskaya T.I. Structure and Metabolic Potential of the Microbiome of Lake Baikal Upper Sediment Layers Determined by Metagenome Analysis // Microbiology, 2023. V. 96. P. 56–62.
3. Cabello-Yeves P.J., Zemskaya T.I., Zakharenko A.S., Sakirko M.V., Ivanov V.G., Ghai R., Rodriguez-Valera F. Microbiome of the deep Lake Baikal, a unique oxic bathypelagic habitat // Limnology and Oceanography, 2020. V. 65. P. 1471–1488.
4. Chernitsyna S., Elovskaya I., Pogodaeva T., Bukin S., Zakharenko A., Zemskaya T., Bacterial communities in a gradient of abiotic factors near a sulfide thermal spring in Northern Baikal // Diversity, 2023. V. 15. № 298.
5. Falkner K.K., Measures C.I., Herbelin S.E., Edmond J.M., Weiss R.F. The major and minor element geochemistry of Lake Baikal // Limnology and Oceanography, 1991. V. 36. P. 413–423.
6. Griebler C., Lueders T. Microbial biodiversity in groundwater ecosystems // Freshwater Biology, 2009. V. 54. P. 649–677.
7. Maltseva A.I., Elcheninov A.G., Klyukina A.A., Gololobova A.V., Lavrentyeva E.V., Banzaraktsaeva T.G., Dambaev V.B., Barkhutova D.D., Zavarzina D.G., Frolov E.N. Microbial diversity of the Baikal Rift Zone freshwater alkaline hot springs and the ecology of polyextremophilic dissimilatory iron-reducing bacteria // Biology, 2025. V. 14. № 1716.
8. Pavlova O.N., Chernitsyna S.M., Bukin S.V., Lomakina A.V., Shubenkova O.V., Smirnova D.K., Zemskaya T.I. The source of thermophilic bacteria in Lake Baikal cold sediments–coastal hydrotherms or deep fluids? // Microbiology, 2024. V. 93. P. 338–343.
9. Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Archipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P., First experience of monitoring coseismic and aseismic variations of ORP, pH, and temperature of groundwater in the Kultuk reservoir in real time (Baikal rift system) // Geology and Environment, 2023. V. 3. P. 161–181.

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ И ФОРМЫ СЕРЫ В ТЕРМАЛЬНЫХ ВОДАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

Зиппа Е.В.¹, Борзенко С.В.²

¹Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
СО РАН, Томск, zev-92@mail.ru

²Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита

Аннотация. Определен состав и генезис растворенных форм серы в термальных водах Байкальской рифтовой зоны. Изучены воды с минерализацией до 1 г/дм³, температурой 20–76 °С, величиной pH 7.43–9.71. Концентрации серы SO₄²⁻ 0.73–5.09 ммоль/л, S²⁻–3.12–3908 мкмоль/л. Содержание S₂O₃²⁻ и S⁰ варьируется в диапазоне 1.25–268.91 и 2.2–17.5 мкмоль/л соответственно. В наиболее щелочных термах с восстановительными условиями восстановленные формы достигают 73 % от общего количества растворенной серы. В менее щелочных источниках доминирует сера SO₄²⁻, восстановленная сера снижается до 0.36 %. Анализ изотопного состава серы показал, что содержания сульфатов контролируются процессом сульфатредукции, окислением сульфидов, а также диспропорционированием SO₂.

Ключевые слова: термальные воды, формы серы, генезис серы, изотопный состав серы

Abstract. Sulfur species and its origin were identified in thermal springs of Baikal Rift Zone. The water with TDS below 1 g/L, temperature 20–76°C, and pH 7.43–9.71 have been studied. Concentrations of SO₄²⁻ sulfur were 0.73–5.09 mmol/L, S²⁻ – 3.12–3908 μmol/L, S₂O₃²⁻ – 1.25–268.91 μmol/L and S⁰ – 2.2–17.5 μmol/L. The reduced sulfur species achieved 73 % of total dissolved sulfur in more alkaline springs. The sulfur of SO₄²⁻ dominated in more acid waters whereas reduced species did not exceed 0.36 %. Results of sulfur isotopic composition analysis showed that sulfates were controlled by sulfate-reduction, sulfides oxidation and SO₂ disproportionation.

Keywords: thermal water, sulfur species, sulfur origin, sulfur isotopes

Сера является элементом с переменной валентностью и в зависимости от протекающих окислительно-восстановительных процессов находится в различных формах в водной среде. В термальных водах сера существует в степени окисления от S²⁻ до S⁶⁺ и участвует во многих химических реакциях. Наиболее распространенными формами серы в природных водах являются сульфат-ион, кислоторастворимые сульфиды, элементная сера, тиосульфаты и сульфиты [9].

В гидротермальных областях сера может поступать из грунтовых вод, магматических газов, в процессе растворения вмещающей породы [8, 13] и в результате биогенных процессов [12]. Концентрации и изотопный состав серы в термальных водах не только контролируются равновесием вода – порода, но и зависят от множества кинетических процессов и сложных реакций окисления, восстановления и диспропорционирования [9].

Для некоторых термальных источников Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) [4] были ранее определены концентрации форм и изотопы серы сульфата [6]. Миграция и трансформация различных форм серы в термальных водах послужат основой для детального описания процессов и механизмов формирования их геохимического облика, что входит в состав актуальных проблем современной гидрогеохимии. В этой связи цель настоящего исследования: (1) получение актуальных данных о концентрациях растворенных форм серы (окисленных и восстановленных); (2) определение генезиса растворенных сульфидных и сульфатных форм серы в термальных водах БРЗ и описание основных процессов, участвующих в их распределении.

Объектом исследования являются термальные воды, источники которых локализованы в центральной части БРЗ. Выходы термальных вод приурочены к глубинным разломам и в основном сложены гранитами палеозойского и протерозойского возраста. Отбор проб термальных вод проведен в 2016 и 2024 гг. Анализ растворенных форм серы проведен согласно методикам [2, 3] в лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии ИПРЭК СО РАН (г. Чита). Изотопный состав серы проанализирован на анализаторе Flash EA-1112 (Thermo Scientific, Германия) в конфигурации S по стандартному протоколу конвертирования серы сульфата и сульфида в SO₂. Измерение изотопных отношений ³⁴S/³²S проведено на масс-спектрометре MAT-253 (Thermo Scientific, Германия) относительно лабораторного

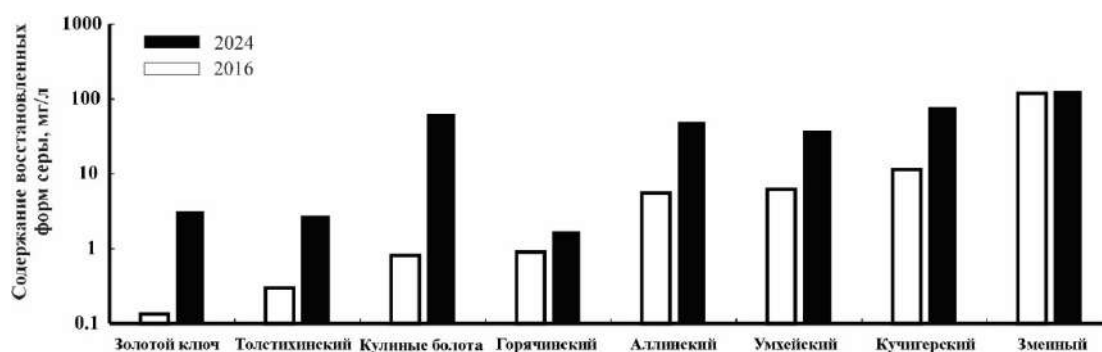
стандартного газа SO_2 , калиброванного по международным стандартам IAEA-S-1, IAEA-S-2, IAEA-S-3 и NBS-127. Результаты измерений представлены в общепринятой форме: $\delta^{34}\text{S} = (\text{R}_{\text{образец}}/\text{R}_{\text{стандарт}} = 1)$ и выражены в ‰, где $\text{R}_{\text{образец}}$ и $\text{R}_{\text{стандарт}}$ – отношение $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ в образце и стандарте соответственно. Воспроизводимость результатов $\delta^{34}\text{S}$ составляла ± 0.1 ‰ (1σ) для стандартов ($n=10$) и образцов. Результаты измерений $\delta^{34}\text{S}$ даны в отношении к международному стандарту VCDT. Изотопный анализ выполнен в лаборатории стабильных изотопов аналитического центра ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток),

По химическому составу исследуемые термальные воды в основном ультрапресные, щелочные, с переменной окислительно-восстановительной обстановкой, относятся к $\text{SO}_4\text{-Na}$ типу, в меньшей степени – к $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$ и лишь в единичном случае – к $\text{SO}_4\text{-Ca-Na}$ типу [15]. Температура воды изменяется от 19.8 до 75.6 °C. Величина pH изменяется от 8.14 до 9.43, за исключением одного родника, где среда является близкой к нейтральной (pH=7.4). По величине Eh термы характеризуются как восстановительной (Eh от –438 до –60 мВ), так и переменной окислительно-восстановительной обстановкой (Eh 57–113 мВ).

Концентрации доминирующих анионов SO_4^{2-} и $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ составляют соответственно 70–489 мг/дм³ и 98–586 мг/дм³. Хлор-иона содержится несколько меньше – 9.04–48.83 мг/дм³. Среди катионов преобладает Na^+ , концентрации которого изменяются от 77 до 263 мг/дм³. Содержания Ca^{2+} (4.7–44.9 мг/дм³), Mg^{2+} (0.01–0.93 мг/дм³) и K^+ (0.87–8.35 мг/дм³) достаточно низкие. Кроме этого, для исследуемых вод характерны повышенные концентрации фтора и кремния. Концентрации F^- составляют 3.4–19.9 мг/дм³, содержание SiO_2 находится в диапазоне 54–118 мг/дм³. Содержание органического углерода не превышает 4 мг/дм³ ($\text{C}_{\text{орг.}}$ 0.05–3.94 мг/дм³) [15].

Концентрации серы SO_4^{2-} изменяются от 0.73 до 5.09 ммоль/л и в среднем составляют 74 % от всех присутствующих форм серы. Однако в источниках Аллинский, Кулиные болота, Кучигерский, Змеиный в сумме общей серы доминирует восстановленная сера HS^- . Хотя в большинстве случаев восстановленные формы серы идентифицированы в значительно меньших количествах, их суммарное содержание варьируется от 6.89 мкмоль/л в источнике Гусихинский до 3961.25 мкмоль/л в Змеином при среднем значении 823 мкмоль/л. На долю восстановленных форм серы приходится 0.19–73 % от суммарного содержания серы при среднем значении 27 %. В большинстве случаев гидросульфидная сера является доминирующей среди всех восстановленных форм в исследуемых термах. Исключение составляет Уринский источник, где элементная сера преобладает над другими восстановленными формами, а содержание серы HS^- ниже $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$. Концентрации S^{2-} (HS^-) изменяются от 2.50 до 3908.44 мкмоль/л, процентная доля составляет соответственно от 13 до 99 % (среднее 75 %) от суммарного содержания восстановленной серы. В значительно меньших количествах находятся S^0 и $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, концентрации которых составляют от 2.19 до 18.44 мкмоль/л (среднее 9.16 мкмоль/л) и от 1.25 до 268.91 мкмоль/л (среднее 61.02 мкмоль/л) и занимают 0.2–74 % (среднее 14 %) и 1–24 % (среднее 11%) от суммы восстановленных форм соответственно. Для подавляющего большинства термальных родников с доминирующей сульфидной серой среди восстановленных форм характерно преобладание тиосульфатов над элементной серой. Однако есть и исключения, например источники Горячинский, Золотой ключ и Алгинский, где элементная сера доминирует над тиосульфатной. В 2016 г. концентрации восстановленных форм серы значительно ниже, чем в 2024 г. (рисунок). Суммарное содержание восстановленных форм составляло от 2 до 3701 мкмоль/л. Результаты анализа изотопного состава показали, что сульфидная сера обеднена тяжелым изотопом по сравнению с сульфатной. Для сульфидной формы значения $\delta^{34}\text{S}$ изменяются от –0.5 до +5.3 ‰ при среднем значении 2 ‰. Величина $\delta^{34}\text{S}$ сульфатной серы изменяется от 10.4 до 29.8 ‰ при среднем значении 20.2 ‰. Коэффициент фракционирования составляет 1.010–1.030 при среднем значении 1.019, соответственно сульфидная форма серы обеднена тяжелым изотопом относительно сульфатов на 10–29 %. Дополнительно получены данные о изотопном составе углерода гидрокарбоната, величина $\delta^{13}\text{C}(\text{HCO}_3^-)$ изменяется от –27.8 до –6,6 ‰.

Известно, что присутствие серы в той или иной форме в термальных водах связано с двумя основными процессами, а именно химическим и бактериальным окислением сульфидов и восстановлением сульфатов [7]. Сульфатная сера является продуктом окисления сульфидов до сульфат-иона и образует продемонстрированные выше формы серы (S^{2-} , S^0 и $S_2O_3^{2-}$) с дальнейшим диспропорционированием SO_2 . Элементарная сера занимает особое место в цепочке переходных состояний серы в водных растворах, поскольку образуется в цепи окислительных реакций при бактериальном или химическом окислении сероводорода или сульфидов и отсутствует при сульфатредукции [7, 9]. Наиболее благоприятные условия для образования S^0 существуют на границе анаэробных и аэробных сред [7]. Реакции окисления сульфидов с дальнейшим диспропорционированием сернистого газа объясняют наличие сульфатной серы среди всех форм в термальных водах и присутствие элементарной серы S^0 в бескислородной среде [7, 9]



Распределение восстановленных форм серы в термальных водах БРЗ в 2016 и 2024 гг.

Сульфидная сера имеет биогенную природу и является продуктом сульфатредукции. Об этом свидетельствует высокий коэффициент изотопного фракционирования (1.010–1.030). Восстановление сульфатной серы до сульфидов в основном протекает в присутствии термофильных сульфатредуцирующих бактерий [7, 10]. Проведенные ранее исследования подтверждают наличие таких термофильных сульфатредукторов, как *Thermodesulfovibrio* (класс *Nitrospira*) [1]. Источником энергии для термофильных сульфатредуцирующих бактерий и, в целом, для образования органического вещества в глубоких гидротермальных системах может быть водород, частично формирующийся при окислении сульфидов [7, 10]. Широкое распространение таких бактерий в термах связано с повышенной растворимостью водорода в условиях высокого гидростатического давления [11]. Кроме этого, содержание $S_{орг.}$ в термальных источниках (0.05–3.94 мг/дм³) является достаточным для протекания реакции бактериальной сульфатредукции [7]. Дополнительно о возможности протекания реакции восстановления сульфатов свидетельствует уменьшение концентраций сульфатов по мере роста содержания восстановленных форм, и в частности сульфида, и легкий изотопный состав углерода гидрокарбонат-иона, $\delta^{13}C(HCO_3^-)$.

Несмотря на то, что формирование сульфидной формы серы является результатом сульфатредукции, некоторое утяжеление значений $\delta^{34}S-S^{2-}$ (до 5.3 ‰) может свидетельствовать об участии глубинных процессов. В качестве подтверждения этого предположения может быть использован факт повышенной сейсмической активности за последние десять лет непосредственно в пределах исследуемого района (по данным БФ ФИЦ ЕГС РАН) и рост концентраций восстановленных форм серы.

Таким образом, полученные данные по формам серы и изотопному составу ее растворенных сульфидных и сульфатных форм показывают, что распространение серы в термальных водах центральной части Байкальской рифтовой зоны является продуктом нескольких одновременно протекающих процессов. С одной стороны, окисление сульфидов горячим паром или водой на глубине протекает с образованием H_2S и SO_2 и дальнейшим диспропорционированием SO_2 и формированием S^0 и SO_4^{2-} . Ближе к поверхности, по мере поднятия терм с глубины из-за смешения с холодными кислородсодержащими водами,

возникают еще более благоприятные условия для формирования элементарной серы, где сульфидная сера окисляется при помощи поступающего в систему кислорода [14]. В зоне разгрузки промежуточные формы серы (S^0 , $S_2O_3^{2-}$, SO_3^{2-}) окисляются до образования SO_4^{2-} в кислородных условиях [9]. В щелочных обстановках при наличии элементарной серы обычно образуются такие промежуточные соединения, как полисульфиды, политионаты, сульфиты, которые быстро переходят в тиосульфаты, поскольку последние являются наиболее устойчивыми в щелочной среде [5], поэтому тиосульфаты, являясь продуктом реакции диспропорционирования, зачастую обнаруживаются в водах в условиях отсутствия серы более низких степеней окисления. В этой связи, наряду с преобладающей сульфидной серой среди восстановленных форм, тиосульфаты содержатся в несколько больших количествах, чем сера элементарная. Кроме этого, присутствие элементарной серы среди восстановленных форм и доминирование сульфатной серы в азотных термах также подтверждают протекание процесса окисления сульфидов [7]. С другой стороны, восстановленные формы серы являются продуктом бактериальной сульфатредукции, наиболее интенсивно протекающей в щелочных условиях, но кинетически уступающей процессу окисления сульфидов, поэтому окисленной серы в исследуемых водах содержится больше, чем восстановленной.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-77-10035, <https://rscf.ru/project/24-77-10035/>.

Список литературы

1. Бархутова Д.Д., Раднагуруева А.А., Данилова Э.В. Распространение и разнообразие сульфатредуцирующих бактерий в слабоминерализованных щелочных гидротермах Байкальской рифтовой зоны // *Природа Внутренней Азии*. 2023. № 3(25). С. 17–30.
2. Волков И.И., Жабина Н.Н. Метод определения восстановленных соединений серы в морской воде // *Океанология*. 1990. Т. 30, № 5. С. 778–782.
3. Дубинин А.В., Демидова Т.П., Римская-Корсакова М.Н., Семилова Л.С., Очеретник О.А. Определение восстановленных форм серы в воде анаэробных бассейнов // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 1 (205). С. 37–51.
4. Замана Л.В., Аскаров Ш.А., Борзенко С.В., Чудаев О.В., Брагин И.В. Изотопы сульфидной и сульфатной серы в азотных термах Баунтовской группы (Байкальская рифтовая зона) // *Доклады Академии наук*. 2010. Т. 435, № 3. С. 369–371.
5. Замана Л.В., Борзенко С.В. Элементарная сера в рапе озера Доронинское (Восточное Забайкалье) // *Доклады Академии наук*. 2011. Т. 438, № 4. С. 515–518.
6. Плюснин А.М., Чернявский М.К., Посохов В.Ф. Условия формирования гидротерм Баргузинского Прибайкалья по данным микроэлементного и изотопного состава // *Геохимия*. 2008. № 10. С. 1063–1072.
7. Borzenko S.V., Zippa E.V. Isotopic Composition and Origin of Sulfide and Sulfate Species of Sulfur in Thermal Waters of Jiangxi Province (China) // *Aquatic Geochemistry*. 2019. Vol. 25. P. 49–62.
8. Gunnarsson-Robin J., Stefánsson A., Ono S., Torssander P. Sulfur isotopes in Icelandic thermal fluids // *Journal of Volcanology of Geothermal Resources*. 2017. Vol. 346. P. 161–179.
9. Kaasalainen H., Stefánsson A. Sulfur speciation in natural hydrothermal waters, Iceland // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2011. Vol. 75. P. 2777–2791.
10. Kleine B.I., Gunnarsson-Robin J., Kamunya K.M., Ono S., Stefánsson A. Source controls on sulfur abundance and isotope fractionation in hydrothermal fluids in the Olkaria geothermal field, Kenya // *Chemical Geology*. 2021. Vol. 582. 120446.
11. Merkel A.Y., Podosokorskaya O.A., Sokolova T.G., Bonch Osmolovskaya E.A. Diversity of methanogenic archaea from the 2012 terrestrial hot spring (Valley of Geysers, Kamchatka) // *Microbiology*. 2016. Vol. 85(3). P. 342–349.
12. Ono S., Keller N.S., Rouxel O., Alt J.C. Sulfur-33 constraints on the origin of secondary pyrite in altered oceanic basement // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2012. Vol. 87. P. 323–340.
13. Stefánsson A., Keller N.S., Gunnarsson-Robin J., Ono S. Multiple sulfur isotope systematics of Icelandic geothermal fluids and the source and reactions of sulfur in volcanic geothermal systems at divergent plate boundaries // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2015. Vol. 165. P. 307–323.
14. Xu X., Chen Ch., Lee D.J., Wang A., Guo W., Zhou X., Guo H., Yuan Y., Ren N., Chang J.S. Sulfate reduction, sulfide oxidation and elemental sulfur bioreduction process: modeling and experimental validation // *Bioresource Technology*. 2013. Vol. 147. P. 202–211.
15. Zippa E.V., Ukraintsev A.V., Chernyavskii M.K., Fedorov I.A., Poturay V.A., Domrocheva E.V., Mukhortina N.A., Thermal waters in the Central part of Baikal Rift Zone: hydrogeochemistry and geothermometry (Republic of Buryatia, Russia) // *Geothermics*. 2025. Vol. 130. 103317.

О ХИМИЧЕСКОМ СОСТАВЕ ПРИРОДНЫХ ВОД ПЛАТИНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КОНДЁР (ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ)

Каюкова Е.П., Петров С.В.

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,
epkayu@gmail.com; s.petrov@spbu.ru*

Аннотация. Изучены гидрохимические особенности платиноносного массива Кондёр и основные механизмы формирования химического состава подземных вод массива. Изученные воды являются пресными, в анионном составе вод преобладают гидрокарбонаты, в катионном – обычно магний. Согласно диаграммам Р. Гиббса, процессы выветривания породообразующих минералов являются преобладающими в формировании химического состава вод массива Кондёр. При этом подземные воды насыщены такими минералами, как гематит, гетит, каолинит, иллит, а также $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{a})$ (на основе изучения степени насыщения).

Ключевые слова: подземные воды, химический состав, массив Кондёр

Abstract. The hydrochemical characteristics of the platinum-bearing Kondyor massif and the main mechanisms underlying the chemical composition of its groundwater were studied. The studied waters are fresh, with hydrocarbonates predominating in the anionic composition, and magnesium in the cationic composition. According to R. Gibbs diagrams, weathering of rock-forming minerals predominates in the chemical composition of the Kondyor massif's waters. Furthermore, the groundwater is saturated with minerals such as hematite, goethite, каолинит, $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{a})$ (based on saturation studies).

Keywords: ground water, chemical composition, Kondyor massif

Россыпное месторождение платиноидов Кондёр относится к числу крупнейших в России и мире. Формирование месторождения связано с разрушением коренных источников в пределах Кондёрского массива, имеющего кольцевую структуру диаметром около 8 км. Промышленная эксплуатация объекта ведется с 1984 г. Первоначальная разработка сосредоточилась на наиболее продуктивном участке в пределах кольцевого хребта, где техногенной трансформации подверглись аллювиальные, делювиальные и элювиальные отложения. Горнотехнические работы привели к формированию техногенного ландшафта, перераспределению поверхностного стока, загрязнению природных вод района. Так, на территории наблюдаются визуальные признаки загрязнения: железосодержащие взвеси (ржавая окраска) и поверхностные нефтяные пленки (радужные пленки).

Ультраосновные породы территории могут служить коренными источниками платины в аллювиальных россыпях гидрогенного генезиса. Механизм обогащения аллювиальных россыпей платиной заключается в растворении рассеянных минералов платины в коренных ультраосновных породах, переносе их в поверхностные водотоки и выпадении в донные осадки в момент разгрузки подземных вод [1].

Массив Кондёр сложен водоупорными ультраосновными породами. Кольцевая структура массива играет роль естественного водосборного бассейна. Сток осуществляется подземным и поверхностным образом (небольшая река Кондёр формируется в пределах кольца массива и выходит из него в северной части хребта).

Основной источник питания и поверхностных, и подземных вод – атмосферные осадки (дождевые и талые воды). По данным [2] в ближайшей Сихотэ-Алинской гидрогеологической складчатой области анионный состав дождевых вод смешанный, катионный состав (мг-экв/л): $\text{Ca} > \text{K} > \text{Na} > \text{Mg}$. Циклонические осадки, отобранные в 2012 г., оказались кислыми, ультрапресными с минерализацией около 4 мг/дм³.

До 2014 г. рудная зона участка Аномальный была практически полностью перекрыта почвой и растительностью, а в долинах ручьев — мощным (до 5 м) слоем аллювиальных и техногенных отложений. После того как пологий холм, занимающий большую часть участка, был рассечен сетью бульдозерных дорог, рудная зона проявилась в виде участков с красноватым оттенком почвы, обусловленным окислением сульфидной минерализации. Другим важным диагностическим признаком стали выходы родников с железистыми гелями. Их пространственная приуроченность к рудной зоне объясняется тем, что большая ее часть

расположена в наиболее нарушенном блоке массива, соответствующем зоне разгрузки грунтовых вод кольцевой структуры [3].

В работе представлены данные по химическому составу подземных вод массива Кондёр, полученные в процессе полевых работ 2019 г. Температура и pH были измерены с использованием портативных приборов фирмы «HANNA» непосредственно у водопункта. Пробы воды на макрокомпоненты отбирались в пластиковые бутылки объемом 1.0–1.5 л. Концентрации Cl^- и HCO_3^- были определены объемным методом, содержание SO_4^{2-} – весовым методом в лаборатории кафедры гидрогеологии и инженерной геологии СПбГУ.

Всего было исследовано 13 водных проб. Были опробованы десять источников, руч. Аномальный и скважина (таблица). Все изученные природные воды массива пресные, в основном мягкие, нейтральные, по преобладающим компонентам – гидрокарбонатные натриево-магниевые или магниевые-натриевые, поскольку доминируют ионы HCO_3^- , Mg^{2+} , Na^+ . По данным [1] для нижней зоны подмерзлотных вод характерен гидрокарбонатно-натриевый состав.

Химический состав природных вод массива Кондёр

№	Дата отбора	объект	pH	М-я	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Fe	Mn	Sr
			ед.	г/дм ³	мг/дм ³	мг/дм ³	мг/дм ³	мг/дм ³	мг/дм ³	мг/дм ³	мг/дм ³	мг/дм ³	мг/дм ³
1	20.08.2019	источник	6.6	0.4	10.0	21.9	55.8	268.4	8.0	5.7	0.62	0.01	0.10
2	20.08.2019	источник	7.1	0.7	16.0	54.7	66.5	427	40.0	12.8	0.23	0.01	0.09
3	20.08.2019	источник	7.6	0.4	14.0	25.3	37.3	225.7	22.0	9.9	0.21	0.02	0.04
4	20.08.2019	источник	6.5	0.2	12.0	12.2	16.8	109.8	10.0	11.4	0.10	0.00	0.03
5	20.08.2019	источник	6.9	0.5	6.0	27.5	94.6	378.2	16.0	6.4	44.0	2.00	0.24
6	20.08.2019	источник	7.1	0.2	4.0	18.2	28.2	164.7	5.0	4.3	0.02	0.00	0.05
7	20.08.2019	источник	6.4	0.2	6.0	10.9	18.2	97.6	6.0	9.9	0.03	0.00	0.03
8	22.08.2019	источник	6.3	0.3	10.0	13.4	58.1	225.7	6.0	10.7	7.60	2.50	0.10
9	22.08.2019	источник	7.0	0.5	12.0	35.2	50.9	280.6	42.0	8.5	0.21	0.00	0.09
10	22.08.2019	источник	6.5	0.4	10.0	23.1	56.0	256.2	17.0	9.9	0.16	0.00	0.06
11	6.09.2019	Аномал.	6.7	0.1	8.0	3.6	8.8	54.9	3.0	4.3	<	<	0.02
12	21.11.2019	Аномал.	6.7	0.1	4.0	7.3	21.2	91.5	3.0	5.7	<	0.00	0.04
13	21.11.2019	скважина	7.2	0.2	6.0	4.9	37.8	128.1	3.0	6.4	0.03	0.00	0.09

Примечание. М-я – минерализация; < – меньше предела обнаружения.

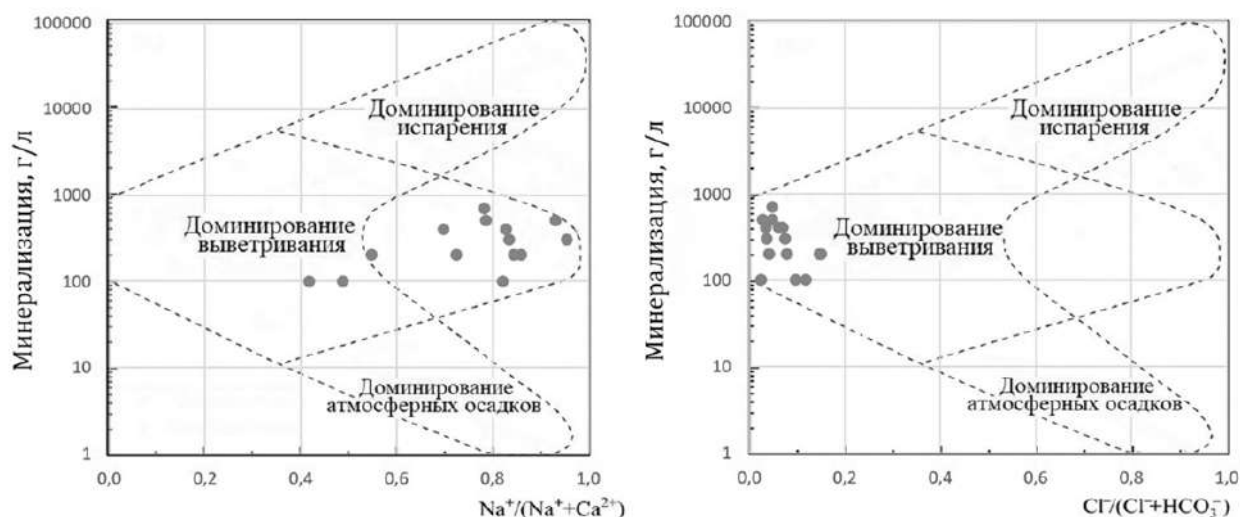
Микрокомпоненты в подземных водах массива Кондёр расположились в следующей последовательности: $\text{Si} > \text{Fe} > \text{S} > \text{Mn} > \text{P} > \text{Ba} > \text{Sr} > \text{Br} > \text{Al} > \text{Rb} > \text{Ti} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Co} > \text{As} > \text{B} > \text{V} > \text{Li} > \text{Mo} > \text{W} > \text{U} > \text{Sb} > \text{Ce} > \text{La} > \text{Nd}$.

Содержания микрокомпонентов и основных катионов анализировали в аналитическом центре ФГБУ Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М. Федоровского (ВИМС) на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой ICAP Qc (Thermo Scientific, США) и атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой ICPE-9000 (Shimadzu, Япония). Методы анализа: масс-спектральный с индуктивно связанной плазмой (МС) и атомно-эмиссионный с индуктивно связанной плазмой (АЭ) по технологии методик НСАМ № 480-Х и 520-АЭС/МС.

Для выявления основных природных механизмов, определяющих формирование химического состава природных вод массива Кондёр (точнее – основного источника

растворенных солей в водах), построены диаграммы Гиббса (рисунок). Диаграммы Гиббса создаются путем построения графиков зависимости доминирующих катионов ($\text{Na}^+/\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$) и анионов ($\text{Cl}^-/\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-$) от минерализации. Согласно [4] по линии ординат откладывают значения минерализации (в г/дм³), по линии абсцисс – отношения катионов и анионов (рассчитанные в эквивалентной форме). Предложенные Р. Гиббсом диаграммы процессов определяют доминирование трех основных естественных механизмов, контролирующих химический состав природных вод: атмосферные осадки, выветривание горных пород и испарение.

В нашем случае вклад процессов выветривания породообразующих минералов в формирование химического состава вод массива Кондёр является преобладающим.



Основные механизмы формирования химического состава подземных вод массива Кондёр на диаграммах Гиббса.

Согласно оценке степени насыщения исследуемых вод вторичными минералами природные воды массива Кондёр пересыщены (индекс насыщения $\text{SI} > 0$) по отношению к гематиту, гетиту, каолиниту, иллиту. В водах присутствует гидроксид железа (III) в виде аморфного вещества или раствора.

Подземные воды массива Кондёр относятся к водам активного водообмена. Вследствие недолгого контакта с вмещающими породами они находятся в начальных стадиях взаимодействия системы вода – порода. Истинно растворенные формы химических элементов включают как свободные ионы, так и комплексные соединения. По результатам термодинамических расчетов преобладающие миграционные формы ряда микроэлементов в водах массива Кондёр – свободные ионы: Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Mn^{3+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , Li^+ , Cu^{2+} . Такие микроэлементы, как Mn^{3+} , Li^+ , Cu^+ , мигрируют только в свободной форме (на 100 %); Sr^{2+} , Ba^{2+} в 95 случаев мигрируют в свободной форме. Fe^{2+} и Mn^{2+} на 78 % мигрируют в свободной форме, а в 16–18 % связываются в карбонатные комплексы.

Климатические особенности в период полевых исследований (2019 г.) существенно отклонялись от среднееголетних показателей. Наиболее выраженная аномалия наблюдалась в августе, когда количество выпавших осадков составило лишь 50 % от климатической нормы, что в два раза меньше среднего значения за предшествующее десятилетие (2010–2020 гг.). Такие значительные отклонения в режиме увлажнения оказали заметное влияние на процессы формирования подземных вод активной зоны водообмена, что необходимо учитывать при интерпретации гидрогеологических данных. Пониженное количество осадков в наиболее влажный период года могло привести к уменьшению инфильтрационного питания подземных вод.

Таким образом, по химическому составу природные воды массива Кондёр гидрокарбонатные натриево-магниевые или магниевые-натриевые, пресные. Основные

естественные механизмы, контролирующие наличие основных анионов и катионов в составе подземных вод района, процессы выветривания. Преобладающими миграционными формами микроэлементов в водах массива Кондёр являются свободные ионы (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Mn^{3+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , Li^{+} , Cu^{2+}).

Список литературы

1. Абрамов В.Ю. Формирование химического состава подземных вод в экстремальных термодинамических условиях. Дисс. ... доктора геол.-мин. наук. Специальность 25.00.07 «Гидрогеология». М., 2015. 192 с.
2. Болдескул А.Г. и др. Ионный состав генетических типов вод малого речного бассейна: стационарные исследования в Центральном Сихотэ-Алине // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33, № 2. С. 90–101.
3. Гуревич Д.В., Полонянкин А.А. Сульфидные полиминеральные Pt-Pd руды массива Кондёр, Хабаровский край: геологическая позиция // Мат-лы Всерос. конференции «Проблемы геологии и эксплуатации месторождений платиновых металлов». 2016. СПб.: Изд-во СПГУ. С. 27–46.
4. Gibbs R.J. Mechanisms controlling world water chemistry // Sci. 1970. № 170. P. 1088–1090.

ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ И ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕЩЕР ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ И МОНГОЛИИ

Кононов А.М.^{1,2}, Гутарева О.С.², Вакс А.³, Брейтенбах С.Ф.М.⁴, Хендерсон Г.⁵, Умбо С.⁴, Маргерум Д.⁴, Бокс М.⁴, Осинцев А.В.⁶, Сокольников Д.С.⁶, Даштсерен А.⁷, Нарангэрэл С.⁷

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, amkononov@yandex.ru

² Институт земной коры СО РАН, Иркутск

³ Геологическая служба Израиля, Иерусалим, Израиль

⁴ Университет Нортумбрии, Ньюкасл-апон-Тайн, Великобритания

⁵ Оксфордский университет, Оксфорд, Великобритания

⁶ Спелеоклуб Арабика, Иркутск

⁷ Институт географии и геоэкологии, Улан-Батор, Монголия

Аннотация. Представлены результаты палеоклиматических реконструкций методами датирования спелеотем из пещер в осадочных породах Сибирской платформы и Монголо-Охотского складчатого пояса. Объекты исследования отличаются временем формирования, продолжительностью и цикличностью геокриологических процессов. Обстановки развития процессов криогенеза существенно отличаются в северной и южной геокриологических областях. Данные δD и $\delta^{18}O$ воды и расплавов льда из пещер говорят о том, что в северной части исследуемой территории до 55 °с.ш. в них сохраняется чистый метеорный сигнал исходной воды. Южнее климатический сигнал изменяется под влиянием испарительного фракционирования или других кинетических эффектов.

Ключевые слова: подземные воды, криогидрогеологические системы, палеоклиматические реконструкции, изотопы водорода и кислорода, пещеры Сибири и Монголии

Abstract. The results of paleoclimatic reconstructions using speleothem dating methods from caves in sedimentary rocks of the Siberian Platform and the Mongol-Okhotsk fold belt are presented. The study sites differ in the formation time, duration, and cyclicity of geocryological processes. The development environments of cryogenic processes differ significantly in the northern and southern geocryological regions. δD and $\delta^{18}O$ data for water and ice melts from caves indicate that in the northern part of the study area, up to 55°N, they retain a pure meteoric signal of the original water. Further south, the climatic signal is modified by evaporative fractionation and other kinetic effects.

Keywords: groundwater, cryohydrogeological systems, paleoclimatic reconstructions, hydrogen and oxygen isotopes, caves of Siberia and Mongolia

Климат в России за последние 10–15 лет становится теплее в 2.5–2.7 раза быстрее, чем в мире [2]. Наиболее интенсивно потепление происходит в Арктической климатической зоне и сопровождается увеличением количества атмосферных осадков, деградацией мерзлоты, ростом опасных погодных явлений, что вызвано сокращением площади арктического морского льда [3].

Повышение среднегодовой температуры приводит к устойчивому потеплению многолетнемерзлых пород (ММП) в северной геокриологической области на 0.39 °C за десятилетие [4] и устойчивой деградации и сокращению площади распространения ММП в Монголии [5]. В связи с этим становится актуальным прогноз климатических изменений, опирающийся на палеоклиматические и геокриологические исследования.

В 2008 г. стартовал крупный международный проект по реконструкции климата на основе датирования спелеотем (стагмиты, натечные коры) и изучению пещер Сибири и Монголии [6–8]. В ходе проекта с помощью U-Th и U-Pb методов датирования определялись периоды роста спелеотем и перерывы, свидетельствующие о длительных этапах оттаивания и промерзания ММП. Комплексные исследования в пещерах наряду с мониторингом температурного режима включали изучение химического и изотопного состава подземных вод и расплавов льдов и специфических компонентов в карбонатах.

Объектами исследования послужили пещеры, распределенные на территории от арктической дельты Лены до юга Монголии (пустыни Гоби), пересекающие крупные гидрогеологические структуры Сибирской платформы и Монголо-Охотской складчатой

области. Ключевые объекты размещены в различных геокриологических условиях северной и южной геокриологических областей.

Палеоклиматические реконструкции свидетельствуют о том, что северная и южная геокриологические области имеют существенное отличие на протяжении очень длительного периода времени. В пещере Ледяной Ленской лед мог сохраниться на протяжении последних 420 тыс. лет в ходе морских изотопных стадий (МИС) 1–9. Таяние многолетнемерзлых пород в ходе очень теплого межледникового периода МИС 11 сопровождалось увлажнением пустыни Гоби (рост карбонатов в пещерах Шер-Хана и Гурван-Зэрэд). Это свидетельствует о перестройках климата в ходе крупного климатического перехода Среднего Брунеса, включающего изменения температуры атлантической водной системы и формирование арктического морского льда [9]. Для северной геокриологической области характерно более стабильное состояние ММП в интервале теплых межледниковых периодов МИС 13, 17 и холодных МИС 16 и 18. За последние 1.5 млн лет отмечаются смещения границы северной геокриологической области на север в ходе теплых межледниковий МИС 19, 21, 23, 25, 31, 37 и смещение на юг в ледниковые периоды МИС 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40. В период 1.2–1.5 млн лет (МИС 41–50) многолетнемерзлые породы в районе пещеры Ледяной Ленской отсутствовали даже в ледниковые периоды, что говорит о смещении границы северной геокриологической области на север. Для южной геокриологической области (пещеры Охотничья и Ботовская) выявлены периоды формирования многолетнемерзлых пород в ледниковые периоды МИС 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 и устойчивые периоды таяния мерзлоты в межледниковых МИС 1, 5.5, 7.1–7.3, 9, 11, 13, 15, 17.

Ледяная Ленская пещера расположена на юге Якутии на границе северной и южной геокриологической зоны и находится в суровых климатических условиях. Среднегодовая температура воздуха на поверхности достигает -7°C , а в пещере около -1.3°C . Пещера заложена в карбонатных породах и полностью проморожена на протяжении последних 420 тыс. лет. Массивный лед заполняет гроты и ходы пещеры, свободная вода отсутствует даже в летний период, циркуляция воздуха обеспечивает приток теплого воздуха, что приводит к формированию кристаллов льда на стенах и сводах. Химический состав подземных вод и расплавов льдов гидрокарбонатный или сульфатно-гидрокарбонатный, магниевый-кальциевый. Величина минерализации подземных вод достигает 350 мг/дм^3 , а расплава льда – 50 мг/дм^3 .

Пещера Ботовская находится в Жигаловском районе в зоне прерывистого распространения ММП. Среднегодовая температура воздуха на поверхности достигает -5°C , а в пещере около $+1^{\circ}\text{C}$. Пещера является уникальным объектом с разветвленной сетью галерей протяженностью более 70 км. Морфология ходов пещеры имеет прямую связь с литологией и трещиноватостью вмещающих карбонатных пород, залегающих между прослоями песчаников. Подземные воды имеют инфильтрационное происхождение и проявляются в виде капелей, луж и небольших водоемов. Галереи пещеры залегают на глубине ниже границы годовых теплооборотов, сезонный лед встречается только в привходовых частях и связан с циркуляцией холодного воздуха в зимний период. Химический состав подземных вод гидрокарбонатный кальциево-магниевый и магниевый-кальциевый, с величиной минерализации $168\text{--}230\text{ мг/дм}^3$. Расплавы льдов гидрокарбонатные кальциевые, пресные с минерализацией до 36 мг/дм^3 .

Пещера Охотничья расположена в карбонатных массивах Приморского хребта, в зоне островного распространения ММП. Среднегодовая температура воздуха на поверхности составляет -1.6°C , а в пещере около $+0.1^{\circ}\text{C}$. Лед в пещере в основном сезонный и представлен ледяными сталагмитами и корами льда на стенах в привходовой части. Многолетние массивные льды были обнаружены при открытии пещеры, но в настоящее время деградировали. В пещере обнаружен метастабильный криогенный минерал икаит [1]. Подземные воды распространены во всех частях пещеры и проявляются в виде капелей и небольших водоемов. В пещере выделяется две гидрогеохимические зоны: подземных вод сульфатно-гидрокарбонатного магниевый-кальциевого состава с минерализацией 56--

339 мг/дм³ и гидрокарбонатного магниевно-кальциевого состава с минерализацией от 258 до 300 мг/дм³.

Пещеры в северной части Монголии расположены в карбонатных массивах на юге оз. Хубсугул и в Дархадской депрессии, наиболее крупные из них – Хавтсгаит и Хуит. Среднегодовая температура воздуха на поверхности составляет –1.3 °С, а в крупных пещерах – около +0.5 °С. Многолетнемерзлые породы в местах заложения имеют сплошное и островное распространение. Лед в пещерах представлен разнообразными формами массивных слоистых образований, сталагмитами, ледяными водопадами и корами. Химический состав подземных вод гидрокарбонатный кальциево-магниевый и магниевно-кальциевый, с величиной минерализации 255–289 мг/дм³. Расплавы льдов гидрокарбонатные кальциевые, пресные, с минерализацией до 44 мг/дм³.

Диапазон состава стабильных изотопов δD и $\delta^{18}O$ карстовых вод в виде капли, озер и луж, в исследуемых пещерах варьируется по δD от –102.7 до –152.2 ‰, по $\delta^{18}O$ от –13.55 до –19.70 ‰. Средние значения состава воды в п. Ботовской равны по δD –137.6, по $\delta^{18}O$ –18.50 ‰, в п. Охотничьей – по δD –129.8, по $\delta^{18}O$ –17.16 ‰. Средние значения состава многолетнего льда в п. Ледяная Ленская равны по δD –125.2, по $\delta^{18}O$ –15.62 ‰, в п. Ботовской равны по δD –128.0, по $\delta^{18}O$ –16.21 ‰, в п. Охотничьей – по δD –109.3, по $\delta^{18}O$ –14.37 ‰. В пещерах Хавтсгаит и Хуит диапазон состава стабильных изотопов δD и $\delta^{18}O$ карстовых вод в виде капли составляет по δD от –68.1 до –95.2 ‰, по $\delta^{18}O$ от –8.55 до –13.18 ‰. Диапазон состава расплавов льда по δD от –68.7 до –82.8 ‰, по $\delta^{18}O$ от –8.90 до –11.80 ‰.

Уравнения регрессии по данным состава δD и $\delta^{18}O$ воды и льда из пещер позволили определить коэффициенты наклона линий в сравнении с глобальной и местной линией осадков и оценить характер кинетических процессов. В пещерах Ледяной Ленской и Ботовской коэффициент наклона линий регрессии расплавов сезонного и многолетнего льда составляет 7.4–8.0 и наиболее близок к глобальной линии осадков, то есть изотопный состав расплавов льда отражает состав исходной воды. В п. Ботовской вода в виде капель, луж и озер, имея температуру, не превышающую 2 °С, не претерпевает испарительного фракционирования или других кинетических эффектов и сохраняет чистый метеорный сигнал. Для п. Охотничьей коэффициент регрессии в уравнениях карстовых вод равен 6.9, а в расплавах льда – 5.15, что отражает измененный климатический сигнал под влиянием испарительного фракционирования изотопов до попадания в пещеру. Подобная картина характерна для пещер Монголии, где коэффициент наклона линий регрессии для расплавов льда и капель ниже коэффициента местной линии метеорных вод (6.9).

Взаимодействие вода – порода во время инфильтрации атмосферных осадков и талых снеговых вод в пещеры, в ходе которого происходит обмен изотопом кислорода между водой и карбонатной частью вмещающей породы, что выражается в кислородном сдвиге $KS=\delta^{18}O - (\delta D - 10)/8$, не оказывает видимого влияния на изотопный состав, показывая значения, характерные для метеорных вод исследуемого региона. Гидрогеохимические и изотопные исследования, наблюдения за температурным режимом позволили определить специфику этих процессов и выделить ключевые факторы формирования подземных вод и льдов. Химический состав подземных вод и расплавов льда тесно связан с составом вмещающих пород (степень доломитизации вмещающих пород, наличие прослоев сульфатных пород). Особенности рельефа и экспозиция склонов карбонатных массивов, степень трещиноватости и проницаемость массивов, наряду с атмосферным питанием, регулируют режим поступления инфильтрационных вод в карстовые системы. Глубокое промерзание пещер часто связано с морфологией ходов, наличием системы связанных разноуровневых галерей, обеспечивающих разнонаправленную циркуляцию воздуха в летние и зимние периоды. В пещерах в ходе криогенеза сформировались конжеляционные и сублимационные льды. При деградации массивных льдов в некоторых пещерах образуются криогенные минералы (икаит, рапидкрикит, криокальцит, криогенный гипс).

Список литературы

1. Базарова Е.П., Кононов А.М., Гутарева О.С., Нартова Н.В. Особенности криогенных минеральных образований пещеры Охотничья в Прибайкалье (Иркутская область) // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII, № 3. С. 67–76.
2. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. М., 2025. 104 с.
3. Семенов В.А. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике // Доклады Академии наук. 2008. Т. 418, №1. С. 106–109.
4. Biskaborn B.K., et al. Permafrost is warming at a global scale // Nature communications. 2019. Vol. 10:264.
5. Jambaljav Y., Yadamsuren G., Khurelbaatar T., Gansuk T.-E., Tsogtbaatar U., Adiya S., Yondon A., Avirmed D., Natsagdorj S. Spatial distribution mapping of permafrost in Mongolia using TTOP // Permafrost and Periglacial Processes. 2022. Vol. 33(4), 386–405.
6. Vaks A., Gutareva O.S., Breitenbach S.F., Avirmed E., Mason A.J., Thomas A.L., Osinzev A.V., Kononov A.M., Henderson G.M. Speleothems Reveal 500,000-Year History of Siberian Permafrost // Science. 2013. Vol. 340:6129. P. 183–186.
7. Vaks A., Mason A., Breitenbach S., Kononov A., Osinzev A., Rosensaft M., Borshevsky A., Gutareva O., Henderson G. Palaeoclimate evidence of vulnerable permafrost during times of low sea ice // Nature. 2020. Vol. 577. P. 221–225.
8. Vaks A., Mason A., Breitenbach S., Giesche A., Osinzev A., Adrian A., Kononov A., Umbo S., Lechleitner F., Rosenshaft M., Henderson G. Arctic speleothems reveal nearly permafrost-free Northern Hemisphere in the late Miocene // Nature Communications. 2025. Vol. 16: 5483.
9. Cronin T.M., Dwyer G.S., Caverly E.K., Farmer J., DeNinno L.H., Rodriguez-Lazaro J., Gemery L. Enhanced Arctic amplification began at the Mid-Brunhes Event ~400,000 years ago. Sci. Rep. 2017. Vol. 7:14475.

ОЦЕНКА ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД СПЛОШНОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ ПО ИЗОТОПНЫМ ДАННЫМ

Лебедева Л.С.

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск,
lyudmilaslebedeva@gmail.com*

Аннотация. Представлены результаты определения $\delta^{18}\text{O}$ и δD в атмосферных осадках, снежном покрове, озерных водах, надмерзлотных водоносных горизонтах и источниках межмерзлотных подземных вод Центральной Якутии по материалам полевых работ 2019–2025 гг. Показано, что озера и связанные с ними подземные воды надмерзлотно-межмерзлотных водоносных горизонтов испытывают испарительное фракционирование, тогда как надмерзлотные подземные воды сохраняют сигнал питающих их атмосферных осадков. Двухкомпонентный изотопный баланс позволил оценить доли снегового и дождевого питания различных типов подземных вод. Сочетание повышенного вклада снеговой составляющей и испарительного фракционирования у части источников подземных вод указывает на значительную роль озер в их питании.

Ключевые слова: *стабильные изотопы, талики, надмерзлотные подземные воды, межмерзлотные подземные воды, Центральная Якутия*

Abstract. This paper presents the results of $\delta^{18}\text{O}$ and δD measurements in atmospheric precipitation, snow cover, lake waters, suprapermfrost aquifers, and springs discharging interpermafrost groundwater in Central Yakutia, based on field investigations conducted in 2019–2025. The results show that lakes and the associated groundwater of suprapermfrost–interpermafrost aquifer systems undergo evaporative fractionation, whereas suprapermfrost groundwater preserves the isotopic signal of the atmospheric precipitation that recharges it. A two-component isotopic mass balance was used to estimate the relative contributions of snowmelt and rainfall to the recharge of different groundwater types. For a subset of groundwater springs, the combination of an increased snowmelt contribution and evaporative fractionation indicates a substantial role of lakes in their recharge.

Keywords: *stable water isotopes, taliks, suprapermfrost groundwater, intrapermafrost groundwater, Central Yakutia*

Стабильные изотопы кислорода и водорода ($\delta^{18}\text{O}$, δD) являются информативными трассерами источников питания и путей циркуляции подземных и поверхностных вод. В криолитозоне формирование подземного стока контролируется сезонным протаиванием, постоянно существующими надмерзлотными и межмерзлотными таликами и озерно-болотными системами [5, 10, 12]. Для Центральной Якутии накоплены значительные данные по гидрогеохимии над- и межмерзлотных подземных вод [1, 2, 4, 11], однако информация о содержании стабильных изотопов, которые могут служить для оценок доли снегового и дождевого питания разных типов вод, остается ограниченной [3].

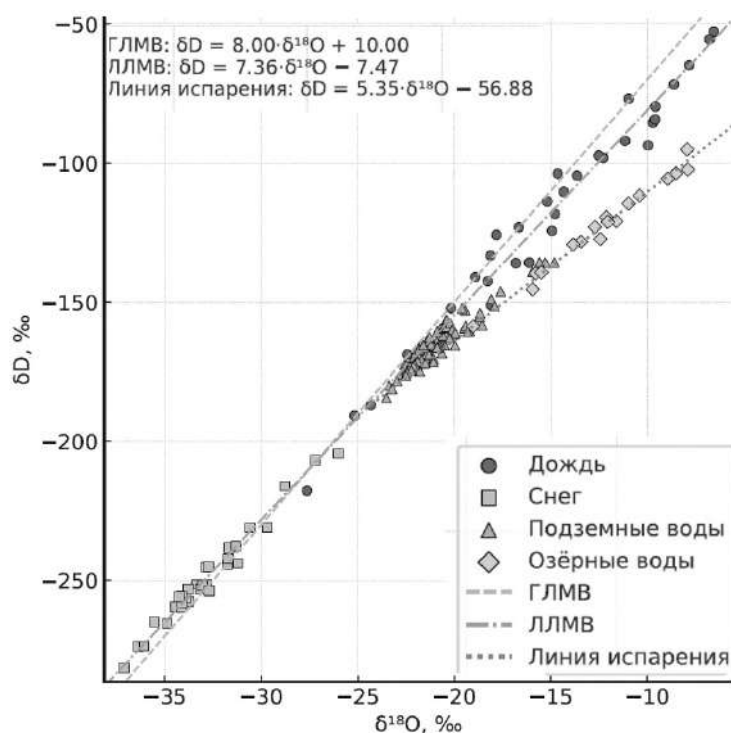
Цель работы – по данным $\delta^{18}\text{O}$ и δD охарактеризовать изотопный состав основных компонентов водного баланса и оценить доли снегового и дождевого питания озер, надмерзлотных водоносных горизонтов и источников межмерзлотных подземных вод в сплошной криолитозоне Центральной Якутии.

Район исследования охватывает около 400 км² правобережья р. Лены, где на Тюнгулюнской надпойменной террасе реки выявлены водоносные надмерзлотные талики, а на Бестяхской террасе – надмерзлотно-межмерзлотные водоносные горизонты. Террасы сложены мелко- и среднезернистыми песками с галечником в основании. На Тюнгулюнской террасе в толще песков встречаются прослой супесей и суглинков. На юге, в бассейнах рек Лютенга и Менда, четвертичные отложения перекрывают кембрийские карбонатные породы, на севере – юрские песчаники. Типичными формами рельефа являются эоловые гряды высотой 3–5 м и мелководные озера (глубина ≤ 4 м). Мощность многолетнемерзлых пород (ММП) составляет 200–400 м. Надмерзлотно-межмерзлотный водоносный комплекс содержит пресные воды. Формирование их ресурсов происходит за счет надмерзлотных грунтовых вод субэзральных и подозерных субаквальных таликов, а разгрузка осуществляется в озера (Юногестях, Улахан-Тенгютте) и субэзрально в виде крупных родников (Улахан-Тарын, Булуус, Ерюю и др.) с суммарным дебитом $>43\,000$ м³/сут. Подмерзлотные воды слабосоленоватые с минерализацией 1.2–3.2 г/дм³. Их частичная разгрузка происходит через

сквозные талики, развитые под крупными озерами и р. Леной. Климат района резко континентальный, со среднегодовой температурой воздуха $-9.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (по данным метеорологической станции Якутск за 1951–2020 гг.) и годовым количеством осадков 239 мм, из которых в среднем 68 % выпадает в виде дождя.

В 2019–2025 гг. отобрано 203 пробы природных вод: атмосферные осадки, снежный покров, озерные воды, подземные воды надмерзлотных водоносных горизонтов и источники межмерзлотных вод. $\delta^{18}\text{O}$ и δD определены на лазерных анализаторах Picarro в лаборатории стабильных изотопов Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, в РДМИ Научного парка СПбГУ и ЛИКОС ААНИИ с точностью до 0.17 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и до 0.30 ‰ для δD . Построены соотношения $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ для выделения локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ) и линии испарения. Доли снегового и дождевого питания оценены по двухкомпонентному изотопному балансу с использованием средневзвешенных изотопных составов снега и дождя по данным станции GNIP (Якутск) [9] и общепринятых представлений изотопной гидрологии [6, 7, 8, 10].

Изотопный состав природных вод и их положение относительно ЛЛМВ показаны на рисунке. Снежный покров характеризуется наиболее легкими значениями $\delta^{18}\text{O}$ и δD , тогда как дождевые осадки изотопно обогащены. Озерные воды формируют выраженную линию испарения со средним наклоном 5.35, что отражает интенсивное испарительное фракционирование в условиях гипераридного климата [3]. Средний изотопный сигнал подземных вод ($\delta^{18}\text{O} \approx -21\text{ ‰}$, $\delta\text{D} \approx -166\text{ ‰}$) ближе к дождевой воде. Часть проб подземных вод демонстрирует испарительный сдвиг, что интерпретируется как участие испарившейся поверхностной воды (прежде всего озерной) в питании отдельных участков надмерзлотно-межмерзлотных водоносных горизонтов.



Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) исследуемых природных вод, глобальная и локальная линии метеорных вод и линия испарения.

По результатам двухкомпонентного изотопного баланса озера в среднемноголетнем разрезе получают около 66 % воды из снега и около 34% из дождя (таблица). Надмерзлотные водоносные горизонты характеризуются долей снегового питания около 40 % и дождевого около 60 %, что близко к среднемноголетним долям выпадающих твердых и жидких осадков по данным метеорологической станции Якутск. Для некоторых источников надмерзлотно-

межмерзлотных подземных вод выявлена повышенная доля снеговой составляющей (до 58 % для Улахан-Тарына и Юногестяха) при наличии «испарительного» сдвига в теплый период, что указывает на существенную роль озер в их питании. Повышенная доля снеговой воды и испарительный сдвиг характерны для источников, гидравлически связанных с озерами и подоцерными таликами. Такие системы аккумулируют воду в теплый период и обеспечивают ее перераспределение в подземный сток, формируя специфический изотопный сигнал.

Оценки долей снегового и дождевого питания различных типов вод

Природные воды (количество проб)	Доля снега, %	Доля дождя, %	Испарительное фракционирование
Озерные воды (17)	66	34	Выраженное
Надмерзлотные воды (37)	40	60	Отсутствует
Источник Булуус (19)	45	55	Отсутствует
Источники Ерюю (12), Улахан-Тарын (19), Суллар (4), Юногестях (8)	<58	≥42	Присутствует от слабого до выраженного

Озерные воды Центральной Якутии формируют выраженную линию испарения, что отражает интенсивное испарительное фракционирование в летний период. Надмерзлотные подземные воды сохраняют метеорный изотопный сигнал и в среднемноголетнем разрезе демонстрируют преобладание дождевого питания при снеговом вкладе около 40 %. Для ряда источников надмерзлотно-межмерзлотных подземных вод (Ерюю, Улахан-Тарын, Суллар и Юногестях) выявлен повышенный вклад снеговой воды (до 58 %) и сезонное испарительное фракционирование, указывающие на участие вод озер и подоцерных таликов в их питании.

Исследование выполнено в рамках проекта НИОКТР 122012400106–7 «Подземные воды криолитозоны: закономерности формирования и режима, особенности взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами, перспективы использования» (ИМЗ СО РАН).

Список литературы

1. Анисимова Н.П. Криогидрохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск: Наука, 1981. 153 с.
2. Анисимова Н.П., Павлова Н.А. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2014. 189 с.
3. Галанин А.А., Павлова М.Р., Папина Т.С., Эйрих А.Н., Павлова Н.А. Стабильные изотопы ^{18}O и D в ключевых компонентах водного стока и криолитозоны Центральной Якутии (Восточная Сибирь) // Лёд и Снег. 2019. Т. 59, № 3. С. 333–354. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-3-414.
4. Павлова Н.А., Колесников А.Б., Ефремов В.С., Шепелев В.В. Химический состав подземных вод межмерзлотных таликов в Центральной Якутии // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 2. С. 216–227.
5. Ala-aho P., Gardner J., Karjalainen O., Koivusalo H., Rossi P.M., Warsta L., Nikinmaa E., Kløve B. Groundwater and surface water flow processes in cold climates: A review and synthesis // Journal of Hydrology. 2018. Vol. 564. P. 569–585. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.07.021.
6. Clark I.D., Fritz P. Environmental Isotopes in Hydrogeology. Boca Raton: CRC Press, 1997. 328 p.
7. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. Vol. 16. P. 436–468. DOI: 10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x.
8. Gat J.R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 1996. Vol. 24. P. 225–262. DOI: 10.1146/annurev.earth.24.1.225.
9. IAEA/WMO. Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) Database. International Atomic Energy Agency, Vienna. (дата обращения: 29.01.2026).
10. Jasechko S. Global isotope hydrogeology – Review // Reviews of Geophysics. 2019. Vol. 57, No. 3. P. 835–965. DOI: 10.1029/2018RG000627.
11. Pavlova N., Lebedeva L., Efremov V. Lake water and talik groundwater interaction in continuous permafrost, Central Yakutia // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 98. Art. 07024. DOI: 10.1051/e3sconf/20199807024.
12. Walvoord M.A., Kurylyk B.L. Hydrologic impacts of thawing permafrost – A review // Vadose Zone Journal. 2016. Vol. 15, No. 6. Article vzj2016.01.0010. DOI: 10.2136/vzj2016.01.0010.

«ТЯЖЕЛЫЙ» БИОГЕННЫЙ ВОДОРАСТВОРЕННЫЙ УГЛЕРОД ($\delta^{13}\text{C}$) В ВОДАХ ОСАДОЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Лепокурова О.Е.

Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
СО РАН, Томск, LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

Аннотация. На примере различных водных объектов показано, что биогенный растворенный углерод в водах осадочных отложений Западной Сибири может иметь значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ от -30.3 до $+30.9$ ‰. Утяжеление, т.е. концентрирование ^{13}C , происходит под влиянием различных биогеохимических процессов, в каждом конкретном случае индивидуальных.

Ключевые слова: изотопный состав водорастворенного углерода, воды осадочных отложений, Западная Сибирь, уголь, нефть, мерзлота

Abstract. Using various water bodies as examples, it has been shown that biogenic dissolved carbon in sedimentary waters of Western Siberia can have $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values ranging from -30.3 to $+30.9$ ‰. The concentration of ^{13}C , or heaviness, occurs under the influence of various biogeochemical processes, each unique to its own specific case.

Keywords: isotopic composition of dissolved carbon, sedimentary water, Western Siberia, coal, oil, permafrost

В результате работы в 2024–2025 гг. над проектом РНФ «Использование изотопов водорода, кислорода и углерода при интерпретации условий формирования состава вод в средах, богатых органическими веществами (угольные, болотные, озерные и нефтяные воды)» накопилась некоторая «проблемная» информация по изотопному составу вод. Проблема связана с появлением в подземных водах осадочного бассейна нехарактерных значений $\delta^{13}\text{C}$: утяжеленных относительно биогенного источника углерода, а другого генезиса в этих условиях не предполагается. Цель данной работы – на примере разных водных объектов осадочных бассейнов Западной Сибири показать эти отклонения изотопного состава водорастворенного углерода ($\delta^{13}\text{C}$) от общепринятых и попытаться найти им причину.

В основе всех изотопных исследований лежит допущение о постоянстве первозданного изотопного состава любого элемента, существенно измененного впоследствии под воздействием разнообразных процессов. Углеродный метод основан на измерении соотношения $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, которое оценивается отклонением $\delta^{13}\text{C}$ относительно стандарта, приравниваемого к 0 ‰. Мнения по поводу исходного изотопного состава углекислоты расходятся: эндогенная [1] или атмосферная [7], но и та и другая в среднем равны -7 ‰. Эта величина служит естественным началом отсчета для определения направленности геохимических процессов, в результате которых в природе возникают соединения, содержащие более тяжелый (^{13}C) или более легкий углерод (^{12}C), т.е. происходит разделение (фракционирование) изотопов углерода.

Общая закономерность распределения изотопов углерода ^{12}C – ^{13}C сводится к следующему: самые легкие значения $\delta^{13}\text{C}$ (с наибольшей концентрацией ^{12}C) характерны для углеводородных соединений биогенного генезиса и продуктов, генетически с ним связанных, – нефтей, углей; самые тяжелые значения (с концентрацией ^{13}C) – для углеводородных соединений абиогенного генезиса, главным образом в карбонатах и углекислоте, образованной при термометаморфизме карбонатных пород или из магмы. Интервалы $\delta^{13}\text{C}$ для отнесения к определенному источнику углекислоты у разных авторов варьируются, но наиболее встречаемые, по нашему мнению, следующие: 1) атмосферные – с $\delta^{13}\text{C}$ от -11 до -5 ‰, при среднем -7 ‰; 2) биогенные (почвенная) углекислота и CO_2 , образованная при окислении органического вещества, нефтей и углей – $\delta^{13}\text{C}$ от -30 до -18 ‰, при среднем ~ 25 ‰; 3) CO_2 , образованная в результате разложения карбонатных пород, – с $\delta^{13}\text{C}$ от -2 до $+2$ ‰, при среднем ~ 0 ‰; 4) мантийная и магматическая углекислота – с $\delta^{13}\text{C}$ от -4 до -8 ‰, при среднем ~ -7 ‰.

Изотопный состав водорастворенного углерода (DIC – dissolved inorganic carbon), представляет собой сумму трех диссоциатов угольной кислоты, совместно существующих в растворе: $\text{CO}_3^{2-} \leftrightarrow \text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{CO}_{2\text{водн}}$. Переход одной формы в другую сопровождается фракционированием с соответствующим коэффициентом. Например, гидрокарбонат-ион, как правило, тяжелее газообразной углекислоты в среднем на 5–7 ‰ [10]. Однако на распределение изотопов углерода в системе газ – вода – твердый осадок могут оказывать заметное влияние также неравновесный характер процесса, время взаимодействия, химический состав водного раствора, температура воды, pH и прочее [2].

Аналитические исследования изотопного состава водорастворенного углерода и вод проводились в период 2014–2024 гг. в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск) с помощью прибора Isotope Ratio Mass Spectrometer Finnigan™ MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device и GasBench II и FlashEA 1112, до 2014 г – в лаборатории изотопных методов ТФ ФГУП «СНИИГТИМС» методом изотопного уравнивания с использованием универсальной системы подготовки и ввода проб газов GasBench II на масс-спектрометре DELTA V ADVANTAGE. Результаты приводились в промилле относительно стандарта SMOW.

Накоплены данные по изотопному составу разнообразных по условиям формирования вод – от поверхностных до глубоких подземных Западной Сибири (северная и юго-восточная часть Западно-Сибирского артезианского бассейна и Кузнецкий адартезианский бассейн). В основном формируются они в средах, богатых органическим веществом, поэтому изучение изотопного состава водорастворенного углерода достаточно показательно. На поверхности здесь распространены болотные воды, в недрах – пластовые воды нефтяных месторождений на севере и воды угленосных отложений на юге. Детальная гидрогеохимическая характеристика этих объектов представлена в работах [3–5].

Результаты исследований показали, что с изотопным составом самих вод (δD и $\delta^{18}\text{O}$) картина достаточно ясная: поверхностные и подземные воды активного и замедленного водообмена являются инфильтрационными, на глубине – с «кислородным» сдвигом по мере увеличения времени взаимодействия и температуры. Наиболее интересная ситуация с водорастворенным углеродом, изотопный состав которого варьируется в большом интервале значений $\delta^{13}\text{C}$ – 30,3 до +30,9 ‰, т.е. от резко отрицательных до сильно положительных. При этом в данных геолого-гидрогеологических условиях не предполагается другого источника кроме биогенного, за исключением атмосферного CO_2 в поверхностных водах. Рассмотрим по объектам подробнее (таблица).

Поверхностные водные объекты тундровой и лесотундровой природных зон Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО). Полевые исследования проходили в 2020 – 2022 гг. Отобраны 9 речных, 11 озерных, 2 пробы почвенных вод и 3 пробы воды просадок (начальная стадия образования термокарстовых озер). Исследования показали, что интервал значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ от – 25.6 до –3.9 ‰. В данном случае утяжеление водорастворенного углерода (от – 11.0 до –3.9 ‰) связано с наличием атмосферной углекислоты. Общая схема формирования состава следующая: в водах почв и просадок принимает участие только биогенный CO_2 , а в речных и озерных водах, с увеличением размера озер и интенсивности потока движения, начинает принимать активное участие атмосферный утяжеленный CO_2 [4].

Подземные воды зоны активного водообмена ЯНАО. Отобрано в 2021–2022 гг. 19 проб из скважин на хозяйственно-питьевое водоснабжение (в основном атлым-новомихайловский водоносный горизонт). Интервал значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, схожий с поверхностными водами региона, от –30.4 до –4.1 ‰. Настораживает сохраняющийся тяжелый состав углерода, поскольку в данных условиях уже нет дополнительного вклада атмосферного CO_2 и не развиты карбонатные породы, которые могут давать обогащение ^{13}C . При этом, например, вариации значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ у проб из трех рядом расположенных скважин в г. Салехарде на глубине 23, 41, 80 м составляют –15.3, –30.4 и –4.7 ‰ соответственно в одинаковых по химическому составу водах аналогичных отложений. В качестве возможных причин можем предположить наличие криогенной метаморфизации (характерной для территории широкого развития

многомерзлых пород), в результате которой более легкий углерод остается во льду, а более тяжелый переходит в жидкость, или же освобождается метан при оттаивании мерзлоты [9]. Однако вопрос этот требует дальнейшего изучения, в том числе определений изотопного состава углерода и водорода в самом метане [4].

Некоторые водные объекты Западной Сибири с утяжеленным изотопным составом углерода по авторским данным

Водные объекты	Кол-во проб	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, ‰	Возможная причина
Воды рек и крупных озер	18	$\frac{-19.0...-3.9}{-10.0}$	Наличие атмосферной CO_2
Воды реки, протекающей через угольный разрез	1	-0.2	Загрязнение «тяжелыми» водами угольных разрезов
Подземные воды зоны активного водообмена многолетнемерзлых пород	19	$\frac{-30.4...-4.1}{-13.1}$	Криогенная метаморфизация
Подземные воды угольных отложений	28	$\frac{14.0...+30.9}{27.4}$	В результате метанообразования в угольном пласте: метан забирает ^{12}C , углекислота концентрирует ^{13}C
Подземные воды активного водообмена районов добычи угля и угольного метана	7	$\frac{-17.1...-3.6}{-8.7}$	Смешение с «тяжелыми» водами угольных разрезов
Подземные воды апт-альб-сеноманских отложений нефтяных месторождений	10	$\frac{-9.7...+23.6}{5.2}$	Разложении анионов органических кислот метаногенными бактериями
Минеральная вода «Омега»	2	-30.3...-10.7	Низкие концентрации HCO_3^- и Corg

Примечание. В числителе – мин. и макс. значение, в знаменателе – среднее.

Подземные воды угольных отложений Кузбасса. Изотопный состав детально нами изучен и укладывается в пределы значений по известным месторождениям метана угольных пластов других регионов мира. Отобрано 28 проб за период 2012–2022 гг. Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ положительные и самые тяжелые из изученных в регионе: от 14.0 до 30.9 ‰, несмотря на то, что сам уголь имеет легкий изотопный состав углерода $\delta^{13}\text{C}$ – от -24 до -1 ‰. Схема неоднократно нами описана. В результате биогеохимических реакций в угольном пласте образуется метан, который концентрирует легкий изотоп ^{12}C , в нашем случае $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ от -67 до -43.3 ‰. Углекислый газ, наоборот, концентрирует ^{13}C , поэтому значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$: от 6.7 до 22.3 ‰. Гидрокарбонат-ион формируется еще тяжелее по изотопному составу – до 30.9 ‰. Еще больше концентрирует ^{13}C осажденный из вод кальцит [3].

Речные воды угольных разрезов. В 2021 г. отобрана проба воды из реки на территории добычи угля с $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} = -0.2$ ‰. Две другие пробы из удаленных от разреза рек имеют значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} -5.6$ и -5.0 ‰, что, скорее всего, указывает на атмосферный генезис углекислоты. Более тяжелое значение изотопов углерода свидетельствует о возможности загрязнения подземными водами угольных отложений. Подтверждает этот факт повышенная минерализация и содовый состав речной воды [3].

Подземные воды активного водообмена районов добычи угля и угольного метана. Отобрано 7 проб воды за период 2012–2022 гг. с достаточно тяжелым $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ от -17.1 до -3.6 ‰. При этом в аналогичных водах вне площадей добычи угля $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ от -24.4 до -17.6 ‰. Причиной является, конечно, поступление тяжелой углекислоты из залегающих ниже вод угленосных отложений. Каким образом происходит смешение вод, пока непонятно [3].

Пластовые воды замедленного водообмена (в основном апт-альб-сеноманских отложений). Отобраны 10 проб в период 2022–2024 гг. на нефтяных месторождениях: Тазовское, Западно-Малобалыгское, Унтыгейское, Федоровское, Грибное, В.Н. Виноградова.

Интервал значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ от -9.7 до $+23,6$ ‰. Более представительная выборка по пластовым водам разных водоносных горизонтов региона представлена в работе [6], где $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ от -51.8 до $+21.8$ ‰. Имеются данные и по другим нефтяным бассейнам мира с $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ от -20 до $+28$ ‰ [8]. Столь широкий разброс объясняется микробиологической деструкцией органического вещества, протекающей по двум схемам: 1) низкие значения $\delta^{13}\text{C}$ (< -10 ‰) являются результатом разложения анионов органических кислот сульфатредуцирующими бактериями; 2) высокие значения $\delta^{13}\text{C}$ являются результатом деградации анионов метаногенными бактериями (как в случае и с угольными отложениями, описанными выше) [8].

Минеральная вода «Омега» Томской области. На протяжении 20 лет она детально изучалась коллективом, но изотопные данные есть только по двум пробам. Значение $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ в 2011 г. было сверхлегкое -30.3 ‰, а уже в 2023 г. получено достаточно тяжелое -10.7 ‰, т.е. разница составила ~ 20 ‰! При этом оба результата не попали в интервал значений других подземных вод мел-палеогеновых отложений Томской области, где $\delta^{13}\text{C}$ от -18.7 до -26.2 ‰. Для объяснения этого эффекта слишком мало информации. Пока остановимся на низком содержании гидрокарбонат-иона (< 200 мг/дм³) и низких концентрациях органических веществ (< 1 мг/дм³) [5].

При интерпретации генезиса вод и растворенных веществ необходимо не только опираться на изотопные данные, а проводить полную изотопно-геохимическую оценку с учетом геологических условий и особенностей среды. Под непривычными тяжелыми значениями $\delta^{13}\text{C}$ может скрываться биогенный углерод, измененный под действием различных биогеохимических процессов, в природе которых еще нужно детально разбираться. Утяжеление изотопов углекислоты в водах угольных, иногда и нефтяных отложений известно и изучено различными учеными. Концентрация ^{13}C в поверхностных водах объясняется участием доли атмосферного CO_2 , а иногда и наличием загрязнения, т.е. поступлением подземных вод глубоких горизонтов в местах добычи угля (и, по-видимому, нефти). Наибольшие вопросы на данном этапе вызывают достаточно тяжелые значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ в подземных водах зоны активного водообмена ЯНАО, Кузбасса и в минеральной воде «Омега». Если это поступление ниже (или выше) залегающих вод, то остается открытым вопрос по схеме такого смешения.

Исследование выполнено в рамках проекта фундаментальных научных исследования РАН № FWZZ-2026-0047.

Список литературы

1. Галимов Э.М. Геохимия стабильных изотопов углерода / Под ред. А.П. Виноградова. М: Недра, 1968. 226 с.
2. Гуцало Л.К. Формирование подземных вод и газов земной коры по изотопным данным: автореф. дис. ... доктора геол.-мин. наук. Санкт-Петербург: СПбГУ, 1997. 98 с.
3. Лепкурова О.Е., Домрочева Е.В. Изотопный состав природных вод Кузбасса на площадях добычи угольного метана // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335, № 10. С. 71–86.
4. Лепкурова О.Е., Иванова И.С., Пыряев А.Н., Исмагулов О.А. Распределение стабильных изотопов Н, О и С в природных водах района Тазовского нефтегазоконденсатного месторождения (Ямало-Ненецкий автономный округ) // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335, № 2. С. 157–169.
5. Лепкурова О.Е., Мухортина Н.А. Новые изотопно-геохимические данные по минеральной подземной воде «Омега» // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336, № 11 С. 134–144.
6. Новиков Д.А., Пыряев А.Н. Стабильные изотопы О, Н, С в подземных водах нефтегазоносных отложений северных районов Западно-Сибирского осадочного бассейна // Геология и минеральные ресурсы Сибири. 2023. Т. 2 (54). С. 23–30.
7. Поляков В.А., Ферронский В.И. Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир. 2009. 632 с.
8. Carothers W.W., Kharaka Y.K. Stable carbon isotopes of HCO_3^- in oil field waters – implications for the origin of CO_2 // Geochim. Cosmochim. Acta. 1980. 44. 323–333.
9. Sabrekov A.F. et al. Methane in West Siberia terrestrial seeps: Origin, transport, and metabolic pathways of production // Global Change Biology. 2023. 29(1).
10. Vogel J.C. Über den Isotopengehalt des Kohlenstoffs in Süßwasser-Kalkablagerungen // Geochim. Cosmochim. Acta. 1959.16: 236–242.

ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИЕ АРОМАТИЧЕСКИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ В ТЕРМАЛЬНЫХ ВОДАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

Мухортина Н.А., Зиппа Е.В.

Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
СО РАН, Томск, Volkovana@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В результате исследования термальных вод и водовмещающих пород Байкальской рифтовой зоны получены новые данные о содержании и распределении полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Установлено, что в термальных водах концентрация идентифицированных соединений варьируется в диапазоне от 0.17 до 1.15 мкг/дм³, а во вмещающих породах – от 0.021 до 1.19 мкг/кг. Оценка техногенной нагрузки по полученному содержанию ПАУ свидетельствует о низком уровне загрязнения термальных источников. Отличительной особенностью является наличие в составе дибенз(а,һ)антрацена. Выявлена корреляция между суммарным содержанием ПАУ и таким параметром, как общая минерализация, а также концентрацией азота и гелия в выделяющихся газах. Генезис соединений обусловлен преимущественно природными пирогенными и петрогенными процессами.

Ключевые слова: термальные воды, полициклические ароматические углеводороды, генезис ПАУ

Abstract. Thermal waters and water-bearing rocks of the Baikal rift zone were studied. New data on the content and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were obtained. It was established that the concentration of identified compounds varies in the range from 0.17 to 1.15 µg/L in thermal waters, and from 0.021 to 1.19 µg/kg in the host rocks. The assessment of the technogenic load based on the obtained PAHs content indicates a low level of the thermal springs pollution. A distinctive feature is the presence of dibenz(a,h)anthracene. There is a correlation between the total PAHs content and TDS, as well as the concentration of nitrogen and helium in the escaped gases. The PAHs origin is primarily due to natural pyrogenic and petrogenic processes.

Keywords: thermal water, polycyclic aromatic hydrocarbons, genesis of PAHs

Органическое вещество является одним из основных компонентов природных вод и неотъемлемой частью процессов взаимодействия в системе вода – порода – газ – органическое вещество. Присутствующие в термальных водах углеводороды и их производные участвуют в биогеохимических процессах с различной степенью интенсивности, что определяет их существенную роль в формировании органических миграционных форм элементов и комплексных химических соединений. Кроме того, углеводороды в составе термоминеральных лечебных вод способны оказывать разнонаправленное воздействие на бальнеологические свойства: с одной стороны, обогащать воду терапевтически значимыми компонентами, усиливающими ее действие, с другой – вносить потенциально опасные для здоровья вещества.

Образование органических веществ обусловлено как биотическими (фотосинтез, хемосинтез, метаболизм), так и абиотическими (термолиз, абиогенный синтез, геохимические преобразования) процессами, протекающими в широком диапазоне условий – от поверхностных экосистем до глубинных недр и космических объектов. В результате процессов образуется широкий спектр соединений – от низкомолекулярных до высокомолекулярных (алифатические, циклические, предельные и непредельные группы соединений) [3]. Среди этих групп существуют соединения, которые относятся к опасным стойким загрязнителям с канцерогенными и мутагенными свойствами, одной из таких групп являются полициклические ароматические углеводороды (ПАУ).

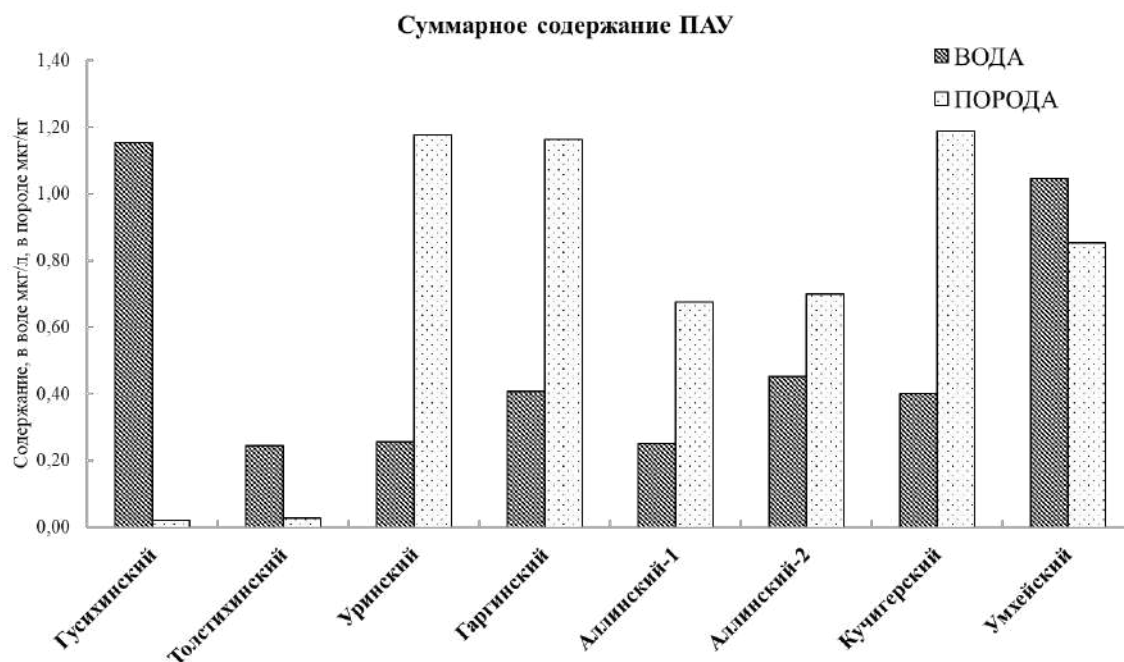
Целью данной работы являлось получение фактических данных по составу и распределению полициклических ароматических углеводородов в термальных источниках Байкальской рифтовой зоны.

Объектом исследования выступают источники термальных вод, локализованные в центральной части Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). БРЗ, которая начала свое формирование в период верхнего мела и продолжает свое развитие в настоящее время, относится к Центрально-Азиатскому подвижному поясу. Выходы термальных вод приурочены к глубинным разломам и в основном сложены гранитами палеозойского и протерозойского возраста. Отбор проб термальных вод проведен в сентябре 2024 г. согласно требованиям для

аналитических испытаний [1] в стеклянную емкость с консервацией *n*-гексаном. Образцы пород отбирали в местах разгрузки термальных вод. Извлечение ПАУ в термальной воде осуществлялось согласно методике государственного экологического контроля ПНД Ф 14.1:2:4.70-96, определение в породе проводилось по методике РД 52.24.537–2019. Анализ осуществлялся в лаборатории физико-химических исследований керна и пластовых флюидов Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (г. Томск). Качественное и количественное определение полициклических ароматических углеводородов выполнялось методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на хроматографе Shimadzu LC-20 (производство Shimadzu, Япония).

Исследуемые термальные воды в основном по своему химическому составу ультрапресные, щелочные с переменчивой окислительно-восстановительной обстановкой, относятся к $\text{SO}_4\text{-Na}$ типу, в меньшей степени – к $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$, и лишь в единичном случае – к $\text{SO}_4\text{-Ca-Na}$ типу [7]. Температура поверхности воды в горячих источниках варьируется от 19.8 до 75.6 °С. Образцы пород представлены биотитовыми гранитами, пегматитами, породообразующими минералами являются кварц, полевые шпаты натриевого и калиевого ряда, глинистые минералы, биотит.

В результате анализа экстрактов из терм и пород методом ВЭЖХ было определено суммарное содержание полициклических ароматических углеводородов. В термальных водах концентрация варьируется от 0.17 до 1.15 мкг/дм³, в породах – от 0.021 до 1.19 мкг/кг (рисунок).



Соотношение концентраций ПАУ в термальных водах и во вмещающих породах.

Высокое содержание ПАУ обнаружено в источниках Гусихинском (1.15 мкг/дм³) и Умхейском (1.05 мкг/дм³), минимальное зафиксировано в Кулиных болотах (0.17 мкг/дм³). В образцах водовмещающих горных пород содержание ПАУ невысокое (от 0.021 до 1.19 мкг/кг). Возможно, это связано со структурным строением и небольшим количеством пор, которые позволяют сорбировать органическое вещество. Однако высокие концентрации в породе на фоне всех исследуемых образцов выявлены для Кучигерского (1.190 мкг/дм³), Уринского (1.176 мкг/дм³) и Гартинского источников (1.162 мкг/дм³).

При рассмотрении молекулярно-массового распределения индивидуальных ПАУ выявлено, что в термах низкомолекулярные 2–3-ядерные ПАУ составляют 12–54 % от суммарного содержания, в среднем 27 %, а концентрация составляет от 0.02 до 0.57 мкг/дм³.

Преобладает фенантрен (0.06 мкг/дм^3), также определены нафталин ($0.0004\text{--}0.0380 \text{ мкг/дм}^3$) и 2-метилнафталин ($0.012\text{--}0.045 \text{ мкг/дм}^3$). В целом содержание низкомолекулярных ПАУ не превышает по сумме высокомолекулярных (ВМ), за исключением Умхэйского источника. В термальных источниках, высокомолекулярные ПАУ составляют 46–88 % от общего содержания, концентрации составляют от 0.15 до 0.66 мкг/дм^3 . Значительный вклад в состав ПАУ вносит дибенз(а,һ)антрацен ($0.04\text{--}0.27 \text{ мкг/дм}^3$), что является отличительной особенностью исследуемых термальных вод. Присутствие дибенз(а,һ)антрацена объясняется эндогенными процессами, при которых энергия выделяется в ходе трансформации сложных органических соединений под действием высоких температур [4]. Концентрации бенз(а)пирена составляет от 0.001 до 0.042 мкг/дм^3 . Присутствие и его превышение ПДК (норма 0.01 мкг/дм^3), вероятно, обусловлены природными пиролитическими процессами, в результате которых продукты горения попадают в природные воды [2].

В результате анализа состава ПАУ во вмещающих породах установлено, что в большинстве исследуемых образцов ВМ соединения преобладают над НМ, как и в термальных водах. Содержание ВМ составляет в среднем от 42 до 63 %, а концентрация варьируется в интервале от 0.009 до 0.024 мкг/кг . Аналогично воде, во вмещающих породах также отмечены высокие концентрации дибенз(а,һ)антрацена ($0.002\text{--}0.008 \text{ мкг/кг}$). Среди НМ ПАУ в породах преобладает фенантрен, его содержание варьируется от 0.003 до 0.012 мкг/кг , максимальная концентрация обнаружена в Аллинском источнике. Присутствие фенантрена, нафталина и 2-метилнафталина в составе низкомолекулярных полициклических ароматических углеводородов может быть обусловлено миграцией водных или газоконденсатных растворов по тектоническим разломам и трещинам. В процессе перемещения данные соединения подвергаются фазовым превращениям, связанным с изменением термобарических условий среды, после чего поступают в термальные воды [2].

ПАУ широко распространены в природных объектах и могут поступать в результате различных процессов. Определение источника поступления является весьма актуальным и дискуссионным вопросом в настоящее время. Для установления генезиса ПАУ применяются индикаторные соотношения, основанные на отношениях схожих по молекулярной массе индивидуальных соединений [5]. К исследуемым образцам были применены соотношения: флуорантен/(флуорантен+пирен), антрацен/(антрацен+фенантрен) и бенз(а)антрацен/(бенз(а)антрацен+хризен). Согласно полученным результатам, вероятным источником поступления ПАУ в термальные воды являются пирогенные реакции. Однако в воды Змеиногорского, Аллинского и Сеюйского источников ПАУ могли поступать в результате сгорания нефтепродуктов, а в воды Кулиных болот, Гусихинского, Толстихинского и Кучигерского источников, вероятно, при естественных подтоках углеводородов. Для упрощения оценки степени загрязненности природных объектов обычно используется коэффициент опасности, на основании которого сделан вывод, что у исследуемых термальных источников низкий уровень техногенной нагрузки [2].

С учетом генезиса ПАУ преобладание их концентраций в термальных водах по сравнению с вмещающими породами, вероятно, обусловлено растворением минералов в ходе взаимодействия вода – порода, сопровождающимся экстрагированием и накоплением ПАУ в водной фазе. Для оценки геохимической подвижности ПАУ в системе вода – порода был применен коэффициент водной миграции Перельмана (K_x) и коэффициент геохимической подвижности [6]. Коэффициент миграции ПАУ в термальных водах изменяется от 0.00045 до 0.021. Отрицательная связь выявлена для коэффициента миграции ПАУ с pH (-0.63) и концентрациями метана в составе выделяющихся газов, при этом положительная корреляция K_x определена с величиной минерализации терм, концентрациями Ca^{2+} (0.44), Na^+ (0.48), K^+ (0.58), HCO_3^- (0.46), SO_4^{2-} (0.55), а также с содержаниями гелия (0.94) и азота (0.90) в составе газа [2].

В результате проведенного исследования получены данные о составе и содержании ПАУ в термальных водах и вмещающих горных породах центральной части Байкальской рифтовой зоны. Доминирующими соединениями в термальных водах являются нафталин,

фенантрен и дибенз(а,һ)антрацен, для пород же – фенантрен, флуорантен и дибенз(а,һ)антрацен. Оценка техногенной нагрузки на термальные воды показала низкий уровень воздействия. Определено, что вероятными источниками поступления ПАУ могут быть как пирогенные, так и петрогенные природные процессы, а также что вмещающие породы могут также быть источником поступления данной группы соединений в термальные воды. Полученные результаты способствуют расширению представлений о распределении и индивидуальных особенностях органической составляющей в термальных водах, что дополнит концептуальную модель формирования их геохимического облика и требует дальнейших исследований для выявления закономерностей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-77-10035, <https://rscf.ru/project/24-77-10035/>

Список литературы

1. ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб. М.: Российский институт стандартизации, 2023.
2. Мухортина Н.А., Зиппа Е.В. Распределение и состав полициклических ароматических углеводородов в термальных водах центральной части Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2026. (в печати). DOI: 10.15372/GiG2026102.
3. Потурай В.А. Органическое вещество в термальных водах Паратунского геотермального района (Камчатка) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 8. С. 98–109.
4. Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А. Фоновый мониторинг полициклоароматических углеводородов. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 233 с.
5. Халиков И.С. Идентификация источников загрязнения объектов природной среды полициклическими ароматическими углеводородами с использованием молекулярных соотношений // Экологическая химия. 2018. Т. 27, № 2. С. 76–85.
6. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1998. 366 с.
7. Zippa E.V., Ukraintsev A.V., Chernyavskii M.K., Fedorov I.A., Poturay V.A., Domrocheva E.V., Mukhortina N.A. Thermal waters in the central part of Baikal Rift Zone: Hydrogeochemistry and geothermometry (Republic of Buryatia, Russia) // Geothermics. 2025. Vol. 130.

ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (НА ПРИМЕРЕ ХАНТЫ-МАНСЬИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА)

Мухортина Н.А.¹, Король И.С.¹, Чуйкина Д.И.¹, Сальникова Ю.И.²

¹Томский филиал Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Томск, volkovana@ipgg.sbras.ru

²Западно-Сибирский филиал Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Тюмень

Аннотация. В работе представлены некоторые гидрогеохимические показатели, используемые при косвенном определении нефтегазоносных территорий. Приведены данные о содержании нефтепродуктов, фенолов, значения перманганатной окисляемости и химического потребления кислорода для подземных вод нефтедобывающих территорий Ханты-Мансийского автономного округа. Установлено, что общее содержание полиароматических углеводородов изменяется в диапазоне от 150,9 до 2829,9 нг/дм³ в различных водоносных горизонтах указанного региона, при этом они наиболее обогащены флуореном, фенантреном и флуорантеном.

Ключевые слова: подземные воды, макрокомпонентный состав, органические вещества, полиароматические углеводороды

Abstract. The paper presents some hydrogeochemical indicators used in the indirect determination of oil and gas-bearing territories. Data on the content of petroleum products, phenols, the values of permanganate oxidability and chemical oxygen consumption for groundwater in the oil-producing territories of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug are presented. It was found that the total content of polyaromatic hydrocarbons varies in the range from 150.9 to 2829.9 ng/l in various aquifers of the specified region, while they are most enriched in fluorene, phenanthrene and fluoranthene.

Keywords: groundwater, macro-component composition, organic substances, polyaromatic hydrocarbons

На территории Западной Сибири сосредоточены богатейшие запасы полезных ископаемых, освоение которых является одним из приоритетных направлений развития экономики нашей страны. Ханты-Мансийский автономный округ (ХМАО) занимает лидирующее положение в отраслевой структуре промышленности региона.

В подземных водах (ПВ) содержится значительное количество соединений, отмечаемых как растворенное органическое вещество (ОВ). Фоновые содержания ОВ, как правило, образуются в результате превращения сложных органических соединений, извлекаемых водой непосредственно из водовмещающих и водоупорных толщ. Для нефтепоисковых целей наиболее интересна та часть ОВ, которая является продуктом взаимодействия залежей и окружающих вод. Известно, что влияние нефтегазовых залежей на окружающие воды по пласту обычно распространяется приблизительно на 1000 м. При этом концентрации растворенного ОВ могут быть косвенными признаками, указывающими на залежи углеводородов нефти или газа. Кроме того, существуют очаги загрязнения подземных вод нефтью и нефтепродуктами (НП), характерные для нефтедобывающих районов и территорий нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий [1]. В этой связи изучение особенностей химического состава вод, количественная оценка их характеристик, регламентируемых СанПиН, приобретают особый интерес, значимость и актуальность.

Пластовые воды нефтегазоносных отложений насыщены углеводородами, основным источником которых, как предполагается, является органическое вещество осадочных пород. Кроме того, в районах, где активно ведется добыча нефти, на первый план выходят проблемы засоления подземных вод рассолами попутно с жидкими углеводородами, извлекаемыми из нефтяных коллекторов [3]. Так, ароматические углеводороды, такие как бензол и толуол, большинство исследователей относят к прямым показателям нефтегазоносности. В последнее время появилась возможность в определении этилбензола и ксилолов, формируется база данных по содержанию полиароматических углеводородов (ПАУ) в ПВ нефтедобывающих территорий [5].

В основу работы были положены данные по химическому составу ПВ, отобранных из девяти скважин нефтегазоносной территории ХМАО. Это воды апт-альб-сеноманского

водоносного комплекса (ВК): 1 - В.Н. Виноградова, 2 – Грибное (1), 3 – Грибное (2), 5 - Западно-Малобалыкское; атлым-новомихайловского водоносного горизонта (ВГ): 4 - Унтыгейское, 6 – Федоровское; и неокомского комплекса (НК): 7 – Аганское (1), 8 – Аганское (2), 9 – Узунское. Пробы отобраны в период с 2022 по 2025 годы.

Физико-химические параметры ПВ определялись по методикам, включенным в федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений, в лабораториях Западно-Сибирского (г. Тюмень) и Томского филиалов Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Методом капиллярного электрофореза с использованием прибора «Капель-205» (Россия) были определены содержания: основных макрокомпонентов (SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), биогенных элементов (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , F^-). Содержание нефтепродуктов и фенолов определяли флуориметрическим методом с использованием анализатора жидкости «Флюорат-02». Анализ нефтепродуктов проводили в соответствии с методикой ПНД Ф 14.1:2:4.128-98, а анализ фенолов – по методике ПНД Ф 14.1:2:4.182-02. Определение содержания индивидуальных ПАУ осуществляли по методике, описанной в [4].

В пробах подземных вод были количественно определены (в нг/дм^3) приоритетные индивидуальные соединения: нафталин (Naph), 2-метилнафталин (2-MeNaph), флуорен (Flu), фенантрен (Phen), антрацен (Antr), флуорантен (Flt), пирен (Pyr), бенз(а)антрацен (BaA), хризен (Chr), бенз(б)флуорантен (BbF), бенз(к)флуорантен (BkF), бенз(а)пирен (BaP), дибенз(а,һ)антрацен (DBA). К группе низкомолекулярных соединений (НМ) были отнесены нафталин, 2-метилнафталин, флуорен, фенантрен и антрацен; остальные ПАУ – к высокомолекулярным (ВМ).

Результаты химического анализа изученных вод приведены в таблицы. Из девяти опробованных водопунктов один (№ 4) относится к пресным водам атлым-новомихайловского водоносного горизонта, отобранным на Унтыгейском месторождении.

Тип вод и характер минерализации являются наиболее общими гидрохимическими показателями условий водообмена в погруженных частях бассейнов. Залежи нефти и газа приурочены, как правило, к водам хлор-кальциевого и гидрокарбонатно-натриевого генетических типов. Для исследуемых образцов величина минерализации изменяется от 0,43 до 29,9 г/дм^3 , воды являются гидрокарбонатными натриевыми по составу (доля HCO_3^- в анионном составе составляет порядка 88 %-экв, доля Na^+ в катионном составе – 90 %-экв), нейтральными (среднее значение pH – 7.1), с повышенным относительно норматива содержанием общего железа.

Пониженные концентрации сульфатов-ионов и повышенные гидрокарбонат-иона в подземных водах большинством авторов считаются надежным показателем нефтегазоносности [2]. Исследуемые ПВ содержат незначительное количество $\text{SO}_4^{2-} > 12,5 \text{ мг/дм}^3$, в то время как содержание иона HCO_3^- зафиксировано от 171 до 671 мг/дм^3 . Определение НП в образцах ПВ показало, что их содержание изменяется от 0,072 до 853 мг/дм^3 . Низкое содержание сульфатов в водах нефтяных месторождений связано с процессами восстановления сульфатов, протекающими при участии анаэробных бактерий в присутствии ОВ, в том числе нефти и газа. Повышение концентрации гидрокарбонат-иона в водах является следствием десульфирования вод в присутствии углеводородов.

Перманганатная окисляемость и химическое потребление кислорода характеризуют количество легко и трудноокисляющихся ОВ в воде. О степени обогащенности водорастворенного ОВ легко или трудноокисляющимися соединениями судят по величине коэффициента ХПК/ПО. Этот коэффициент иногда используется и при оценке перспектив нефтегазоносности. В водах нефтяных залежей его величина колеблется от 3.5 до 10.0, в водах газовых – до 15–30 и в водах непродуктивных зон до 1–5. Для исследуемых образцов значение данного коэффициента изменяется от 6 до 12. С учетом неравнозначности связи значений ХПК, ПО, ХПК/ПО с нефтегазоносностью, проявляющуюся в различных регионах по-разному, указанные показатели следует рекомендовать как косвенные.

Основные физико-химические показатели состава подземных вод ХМАО

Параметры/ ед. изм.	Номер пробы								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Глубина залегания, м	1128	1584	1515	96	1283	1009	1425	2195	2230
pH, ед.рН	7.2	7.0	7.0	7.5	6.9	7.4	7.4	6.9	7.0
CO ₃ ²⁻ , мг/дм ³	< 2.0	–	–	< 6.0	< 2.0	< 2.0	< 6.0	< 6.0	< 6.0
HCO ₃ ⁻ , мг/дм ³	268	671	610	284	217	180	171	501	218
SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³	<12.5	< 0.2	< 0.2	< 0.5	< 2.0	< 2.0	<12.5	<12.5	<12.5
Cl ⁻ , г/дм ³	10.4	14.4	15.2	0.02	10.9	12.0	12.3	17.9	13.8
Ca ²⁺ , мг/дм ³	334	520.8	504.6	4.7	340.0	406.0	683	1730	869
Mg ²⁺ , мг/дм ³	102.1	122.2	138.1	3.0	84.0	101.0	116	124	55
Na ⁺ , г/дм ³	6.1	8.4	8.9	0.11	6.7	7.5	6,8	9.5	8.0
K ⁺ , мг/дм ³	48.6	61.4	68.2	1.1	66.0	40.2	72	99	<12.5
NO ₂ ⁻ , мг/дм ³	0.044	н/о	н/о	0.07	0.02	0.02	0,007	0.063	0,011
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	<12.5	н/о	н/о	< 0.5	<12.5	< 12.5	<12.5	<12.5	<10
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	64.0	43.0	39.7	< 0.5	13.3	21.0	16.8	23.2	15.7
PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	<12.5	н/о	н/о	2.9	<12.5	<12.5	<12.5	<12.5	<12.5
Fe общее, мг/дм ³	1.40	–	–	1.4	12.0	5.6	2.0	28.7	2.6
M, г/дм ³	17.1	23.6	25.1	0.43	18.3	20.2	20.2	29.9	23.0
Нефтепродукты, мг/дм ³	6.46	0.059	0.078	0.072	1.2	0.08	0.77	8.53	>50
ПО, мгО ₂ /дм ³	2.9	9.8	10.5	7.6	17.4	8.0	11.3	20.5	25.5
ХПК, мг/дм ³	17.9	59	67	69	131	76	122	673	306
ХПК/ПО	6.2	6.0	6.4	9.1	7.5	9.5	10.8	32.8	12.0
АПАВ, мг/дм ³	<0.10	<0.10	<0.10	< 0.025	0.79	0.31	0.72	1.1	<0.10
Фенолы, мг/дм ³	0.0044	0.0011	0.0014	<0.0005	0.0011	0.0017	0.003	0.13	0.021
ΣНМ ПАУ, нг/дм ³	220.1	123.3	119.5	228.0	227.2	382.2	840.3	1971.7	46.0
ΣВМ ПАУ, нг/дм ³	166.6	253.0	527.7	104.9	162.8	561.9	243.2	858.2	105.0
ΣПАУ, нг/дм ³	386.7	376.3	647.2	332.9	390.0	944.1	1083.6	2829.9	150.9
ΣНМ/ΣВМ	1.32	0.49	0.23	2.17	1.40	0.68	3.5	2.3	0.4

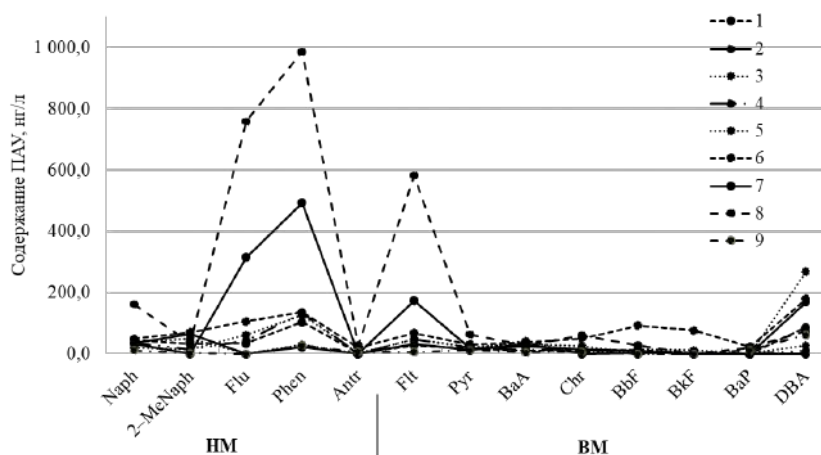
Примечание: М – общая минерализация; «–» нет данных; н/о – не обнаружено при химическом анализе ПО – перманганатная окисляемость, ХПК – химическое потребление кислорода Месторождения: 1 – им. В.Н. Виноградова, 2 – Грибное, 3 – Грибное, 4 – Унтыгейское, 5 – Западно-Малобалыкское, 6 – Федоровское. 7 – Аганское, 8 – Аганское, 9 – Узунское

Фенолы подразделяются на летучие и нелетучие. Известно, что фенолы обычно накапливаются в щелочных водах гидрокарбонатно-натриевого типа в значительно больших количествах, чем в водах хлор-кальциевого типа. Повышенные содержания летучих фенолов тяготеют к приконтурным водам залежей парафинистой легкой нефти и газоконденсата, отсутствуют или содержатся в малых количествах в водах газовых залежей и водах, контактирующих с залежами тяжелых нефтей. В исследуемых образцах ПВ зафиксированы общая концентрация фенолов в пределах от 0,001 до 0,130 мг/дм³, доля летучих фенолов не превысила 7 % отн.

Результаты проведенных аналитических исследований по изучению индивидуального состава ПАУ и их концентраций в подземных водах показали, что общее содержание ПАУ варьируется в диапазоне от 150.9 до 2829.9 нг/дм³. При этом минимум отмечен в пресных водах атлым-новомихайловского ВГ (проба № 4), а максимум в пробе 8 неокомского ВГ. Детальный анализ индивидуальных ПАУ в подземных водах нефтедобывающих территорий

ХМАО (рисунок) показал, что они наиболее обогащены флуореном, фенантреном и флуорантеном.

Таким образом, современные методы исследования растворенного ОВ подземных вод позволяют уточнять косвенные параметры для разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений. А в перспективе, когда будет сформирована достаточная база данных, возможно будет по изменению их концентрации и распределению делать выводы о причинах нефтяных загрязнений природных сред, в том числе подземных вод.



Распределение индивидуальных ПАУ в подземных водах территории ХМАО.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-77-00052, <https://rscf.ru/project/25-77-00052/>.

Список литературы

1. Крайнов, С.Р., Рыженко, Б.Н., Щец, В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. 2-е изд., доп. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. 672 с.
2. Линдт А.Ю. Гидрогеохимические показатели нефтегазоносности доюрского комплекса юго-восточного склона Александровского мегавала // Георесурсы, 2015. Т.2, № 3 (62). С. 31–36.
3. Назаров А.Д. Нефтегазовая гидрогеохимия юго-восточной части Западно-Сибирской части нефтегазоносной провинции. М.: Идея-Пресс, 2004. 288 с.
4. ПНД Ф 14.1:2:4.70-96. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовых концентраций полициклических ароматических углеводородов в питьевых, природных и сточных водах методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (издание 2012 г.). М., 1999. 27 с.
5. Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А. Фоновый мониторинг полициклоароматических углеводородов. Л.Э: Гидрометеиздат, 1988. 233 с.

СВЯЗЬ ФОРМИРОВАНИЯ ИНВЕРСИОННЫХ ВОД И МИНЕРАЛЬНОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ

Павлов С.Х.

Институт земной коры, Иркутск, spavlov@crust.irk.ru

Аннотация. На количественном уровне совместно рассмотрены неразрывно связанные и взаимообусловленные гидрогеохимические и литолого-минералогические процессы в сложных геохимических системах, максимально приближенных к природным. Установлено, что при взаимодействии воды с первичной породой в зависимости от ее состава и количества содержащегося в ней органического вещества процессы эволюционного развития систем идут по разным геохимическим направлениям. В отличие от многочисленных гипотез формирования инверсионных вод и образования сопутствующих им вторичных минеральных образований, имеющих в основном качественное обоснование, результаты проведенного термодинамического моделирования позволили раскрыть геохимическую суть процессов, формирующих геохимический облик инверсионных вод и связанных с ними аутигенных минералов.

Ключевые слова: *инверсионные воды, вторичные минеральные образования*

Abstract. At the quantitative level, the inextricably linked and interdependent hydrogeochemical and lithological-mineralogical processes in complex geochemical systems that are as close to natural as possible are considered together. It is shown that when water interacts with primary rock, depending on its composition and the amount of organic matter it contains, the processes of evolutionary development of systems follow different geochemical paths. Unlike the numerous hypotheses on the formation of inversion waters and the formation of secondary minerals associated with them, which are mostly based on qualitative reasoning, the results of the conducted thermodynamic modeling have revealed the geochemical essence of the processes that shape the geochemical nature of inversion waters and the associated authigenic minerals.

Keywords: *inversion waters and secondary mineral formations*

Результаты данного исследования являются продолжением предыдущей работы автора [6], посвященной проблеме формирования инверсионных вод, имеющей глобальное значение. Глубокий анализ исследований, посвященных этой проблеме, проведен в работе [4]. Различные подходы к формированию инверсионных вод способствовали возникновению самых разнообразных гипотез их генезиса, которые, как показано в упомянутой работе, имеют только качественное обоснование, то есть являются предположениями. Там же отмечается, что ключ к решению проблемы формирования химического состава инверсионных вод находится в количественном познании геохимической сути тех процессов, которые способны сформировать геохимический облик инверсионных вод. Именно с этой стороны проблема формирования инверсионных вод и сопутствующей им минеральной зональности рассматривается в данном исследовании.

С самого начала изучения инверсионных вод исследователи обратили внимание на их тесную связь со вторичными минеральными образованиями [9, 10 и мн. др.]. В работе [5] было установлено, что в некоторых районах вторичная карбонатизация проявляется локально, захватывая при этом большой стратиграфический интервал, формируя структуры, которые были названы «карбонатными столбами». Позднее было установлено более широкое развитие подобных структур и участие в их строении других минералов. Их происхождение связывается с тектоногидротермальной активностью. Одни исследователи формирование вещественного наполнения этих структур объясняют процессами каолинитизации, карбонатизации и цеолитизации [3], другие, наряду с карбонатизацией и цеолитизацией, считают важными процессы выщелачивания [8]. Первые при этом отмечают, что они не зависят или мало зависят от первичного характера пород и фациальных условий их формирования; вторые, напротив, определенные вторичные преобразования состава пород связывают с разными стратиграфическими комплексами. Различные подходы к объяснению рассматриваемой проблемы показывают, что несмотря на заметные достижения в исследовании формирования инверсионных вод и сопутствующих им минералов имеется достаточно высокая степень неопределенности по отношению к принципиальным вопросам, ее раскрывающим. В данной работе предпринята попытка прояснить некоторые

дискуссионные стороны неразрывно связанных и взаимообусловленных сложных процессов, протекающих в глубоких горизонтах осадочных бассейнов.

Исследование проведено с помощью программного комплекса «Селектор W» [2, 12] по степени протекания гидрогеохимического процесса, когда масса воды, равная 1 кг, остается постоянной, а количество породы последовательно увеличивается от 1×10^{-6} до 1×10^0 кг. Идеология, состав и строение модели соответствуют разработанным в предыдущей работе. Вместе с тем в методическом отношении проведены следующие изменения. Расширен состав пород, взаимодействующих с водой. Наряду с глинистым сланцем здесь участвуют два образца песчаника. Первый взят из работы [7], второй из [11]. Как и в предыдущей работе, при неизменных концентрациях серы и фтора в исследуемых образцах последовательно увеличивались содержания органического вещества ($C_{орг}$ от 1 до 5 мас. %), каждой величине которого в образце глинистого сланца соответствовали два значения хлора ($Cl = 0.22$ и 0.49 мас. %), взятые из работы [1].

Поскольку суть гидрогеохимических процессов в определенной степени рассмотрена в предыдущей работе, в рамках данного сообщения кратко отметим лишь выявленные особенности формирования растворов и основное внимание обратим на формирование вторичных минеральных образований, которые обычно рассматриваются довольно бегло, а чаще всего не рассматриваются вообще.

При взаимодействии воды со всеми образцами, в соответствии с увеличением массы породы, сильно изменяется геохимическая обстановка и с различной интенсивностью происходит последовательное увеличение минерализации формирующихся растворов. Процесс этот не линейный, и на разных этапах, а тем более в разных породах результаты этого взаимодействия при одной и той же величине отношения порода/вода существенно отличаются. При содержании $C_{орг}$, равном 1 мас. %, максимальные значения минерализации (г/кг H_2O) составили: в глинистом сланце 8.6, а в песчаниках – 2.2 и 6.1. В растворах глинистого сланца и одного из образцов песчаника количества растворенных веществ достаточно высоки, в то время как минерализация раствора другого образца песчаника почти в 3–4 раза меньше. Результаты расчетов показали, что активность взаимодействия воды с породой сильно увеличивается с повышением содержания органического вещества в породе. В растворах образцов, содержащих 5 мас. % $C_{орг}$, максимальная величина минерализации достигла (г/кг H_2O): в глинистом сланце 30.3, а в песчаниках 45.9 и 48.1. Формируются растворы содового типа, в которых, по мере увеличения содержания $C_{орг}$ в породе от 1 до 5 мас. % в большом количестве присутствует метан, его максимальное содержание достигает 0.3, 0.7, 1.1, 1.5 и 1.8 моль, тогда как максимальное содержание диоксида углерода составило 0.2 моль.

В процессе взаимодействия воды с породой вместе с формированием состава водной и газовой фаз происходит образование представительной твердой фазы, включающей до 19 вторичных минералов, из которых пирит, родохрозит, флюорит и фторапатит присутствуют на уровне аксессуарных. Все минералы появляются и получают развитие на определенных этапах взаимодействия воды с породой в соответствующих геохимических обстановках и при определенных составах и величинах минерализации растворов. Прежде всего рассмотрим те вторичные минеральные образования, о которых упоминалось выше и на которые опираются исследователи, рассматривающие происхождение аутигенных минералов в различных структурных формах.

Каолинитизация активно проявилась в процессе взаимодействия воды со всеми исследованными образцами. Здесь с повышением $C_{орг}$ в породе прослеживается увеличение содержания каолинита более 70–90 мас. %. Доминирующее положение этот процесс занимает на начальных этапах взаимодействия. С увеличением отношения порода/вода и появлением и ростом количества других минеральных образований относительная роль каолинита начинает уменьшаться, но он сохраняет свое присутствие во всем исследованном интервале взаимодействий. В глинистом сланце и первом образце песчаника каолинитизация имеет

довольно сходный характер, в отличие от второго образца песчаника, где этот процесс не просто подавлен, а прекращает ($C_{орг}$ 1 мас. %) или прерывает ($C_{орг}$ 2 мас. %) свое развитие.

Процессы карбонатизации проявились в формировании анкерита, доломита, кальцита, родохрозита и сидерита. Выше отмечалось, что родохрозит относится к аксессуарным и его содержание в твердой фазе песчаника 1 не превышает 0.06 мас. %, а в песчанике 2 и глинистом сланце достигает 0.14 и 0.16 мас. %. В первом образце песчаника карбонатизация проявилась крайне слабо. Образование кальцита и доломита не произошло вообще. Анкерит сформировался во всех образцах, но развитие его остановилось на уровне 3.5 мас. %. Увеличение количества органического вещества в породе проявилось в появлении этого минерала при более низких значениях величины отношения порода/вода, но не отразилось на его количестве. В твердой фазе этого образца формируется также сидерит. При низком содержании $C_{орг}$ сидерит появляется лишь на заключительных этапах взаимодействия и его содержание не превышает 2 мас. %. При повышении $C_{орг}$ в породе до 2 мас. % и более его содержание достигает чуть более высоких значений, чем у анкерита, и также проявляется зависимость появления на более ранних стадиях взаимодействия с максимальным значением около 7.5 мас. % и устойчивой величиной 5 мас. %.

Во втором образце песчаника сидерит не сформировался, но процессы карбонатизации проявились активно. Растворы образцов с низким содержанием $C_{орг}$ сформировали кальцит и анкерит на уровне от 4–8 до 10 мас. %. Растворы образцов с более высоким содержанием $C_{орг}$ начинают формировать доломит устойчиво на уровне 10 мас. %, который несколько подавил развитие кальцита, оттеснив на более поздние этапы формирования и понизив его содержание до 4 мас. %. В то же время эти растворы при ощутимо меньших значениях величины отношения порода/вода начинают формировать анкерит с достаточно высоким содержанием – до 18 мас. % Дальнейшее эволюционное развитие этих систем сопровождается уменьшением содержаний анкерита, которое начинается задолго до формирования доломита и кальцита. Это связано с появлением в этом интервале сфена и ломонтита, которые исчезают при более высоких величинах отношения порода/вода с появлением кальцита и доломита. Содержание доломита стабилизируется с момента образования на уровне 10 мас. %, а между анкеритом и кальцитом некоторое время происходит перераспределение вещества в пользу кальцита, после чего их содержания стабилизируются у анкерита около 11 мас. %, а у кальцита – 4 мас. %.

В образце глинистого сланца процесс карбонатизации в целом сходен с образцом песчаника 2, но проявился заметно активнее в отношении образования анкерита. Этот минерал при всех содержаниях $C_{орг}$ в породе образуется при более низких величинах отношения порода/вода на уровне, приближающемся к 20 мас. %. Увеличение количества перерабатываемой породы сопровождается его понижением до 17 мас. %, обусловленным при низком содержании $C_{орг}$ влиянием ломонтита и сфена, а при более высоком – доломита и кальцита.

Цеолитизация в исследуемых системах выразилась в формировании ломонтита и так же, как и рассмотренные выше процессы, проявилась довольно своеобразно. В образце глинистого сланца, содержащем 1 мас. % $C_{орг}$, ломонтит формируется довольно активно и, достигнув почти 19 % в массе твердой фазы, начинает медленно уменьшаться, но сохраняется до конца исследуемого интервала взаимодействий на уровне около 5 мас. %. Однако уже в следующем образце с более высокой концентрацией $C_{орг}$ и максимальное его содержание (4 мас. %) и продолжительность формирования резко сократились. Дальнейшее увеличение органического вещества в породе привело к прекращению образования ломонтита в твердой фазе растворов глинистого сланца.

Растворы первого образца песчаника, содержащего 1 мас. % $C_{орг}$, образовали ломонтит в твердой фазе менее 3 мас. %, и продолжительность его формирования оказалась еще меньше, чем в глинистом сланце. Растворы этой породы, содержащие более высокие концентрации $C_{орг}$, прекратили образование ломонтита в твердой фазе. Зато во втором образце песчаника процесс ломонтитизации проявился достаточно хорошо. Ломонтит образуется в твердой фазе всех растворов. При ярко выраженном уменьшении количества ломонтита и

продолжительности его формирования с увеличением содержания органического вещества в породе, тем не менее, даже в образце, содержащем 4 мас. % органического вещества, максимальное количество ломонтита приблизилось к 16 мас. %. В образцах с низким содержанием $C_{орг}$ максимальное содержание ломонтита достигает 25, 38 и 47 мас. %.

Кроме рассмотренных и упомянутых выше минералов на разных этапах взаимодействия с различной степенью активности проявились анальцит, аннит, кварц, клинохлор, магнетит, мусковит, рутил и сфен. Каждый компонент твердой фазы внес свой определенный вклад в процесс формирования состава и минерализации растворов и перераспределения вещества внутри твердой фазы. Сопоставление состава модельных растворов с природными подземными водами выявило их близость и свидетельствует о том, что результаты проведенных расчетов с высокой степенью достоверности отражают ход развития исследуемых гидрогеохимических процессов.

Количественное исследование физико-химических взаимодействий в моделях сложных геохимических систем, приближенных к природным, позволило раскрыть геохимическую суть процессов, формирующих геохимический облик инверсионных вод и аутигенных минералов. Исследуемые процессы осуществляются при наличии в породе анионогенных элементов и, главным образом, органического вещества, гидролитическое диспропорционирование и фракционирование которого формирует геохимическую обстановку сложных геохимических систем, состав растворов, газовой фазы и вторичных минеральных образований. Даже весьма ограниченные данные о составе пород, использованных при моделировании, наглядно продемонстрировали их доминирующее влияние на образование аутигенных минералов, в то время как состав водных растворов и газовой фазы различных образцов, при количественных отличиях интегральных характеристик и отдельных компонентов, сохраняет хорошее сходство.

Список литературы

1. Гуляева Л.А., Лосицкая И.Ф. Хлор в меловых и юрских отложениях Газлинской и Каганской групп структур Западного Узбекистана // Геохимия и гидрохимия нефтяных месторождений. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 40–56.
2. Карпов И.К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии. Новосибирск: Наука, 1981. 247 с.
3. Коробов А.Д., Коробова Л.А. «Каолинитовые» и «цеолитовые столбы» Западной Сибири – новые ориентиры обнаружения месторождений нефти и газа // Недра Поволжья и Прикаспия. 2018. Т. 94 (5). С. 18–40.
4. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швеиц В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. 672 с.
5. Лебедев Б.А., Аристова Г.Б., Бро Е.Г., Кузьмина Г.С., Лебедева Г.В., Сахибгареев Р.С., Скубелина Л.С. Влияние эпигенетических процессов на параметры коллекторов и покрышек в мезозойских отложениях Западно-Сибирской низменности. Л.: Недра, 1976. 130 с.
6. Павлов С.Х. Формирование гидрокарбонатных натриевых подземных вод повышенной и высокой минерализации // Подземная гидросфера: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам востока России (XXIV совещание по подземным водам востока Сибири и Дальнего Востока с международным участием), г. Екатеринбург, 21–28 июня 2024 г. С. 150–155.
7. Петтиджон Ф.Дж. Осадочные породы. М.: Недра, 1981. 751 с.
8. Поднебесных А.В., Овчинников В.П. Основные типы вторичных изменений пород коллекторов осадочного чехла Западно-Сибирской плиты // Вестник Томского государственного университета. 2015. (400). С. 393–403.
9. Розин А.А. Подземные воды Западно-Сибирского артезианского бассейна и их формирование. Новосибирск: Наука, СО, 1977. 101 с.
10. Розин А.А., Сердюк З.Я. Преобразование состава подземных вод и пород Западно-Сибирской плиты под воздействием глубинного углекислого газа // Литология и полезные ископаемые, 1970. (4) С. 102–113.
11. Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдисов А.А. Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. М.: Наука, 1990. 182 с.
12. Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения. Новосибирск: Гео, 2010. 287 с.

ХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ПРОЛИВА МАЛОЕ МОРЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Пеллинен В.А., Черкашина Т.Ю., Иванова Д.С., Пашкова Г.В.
Институт земной коры СО РАН, Иркутск, pellinen@crust.irk.ru

Аннотация. В статье представлены результаты геоэкологического исследования вод пролива Малое Море (оз. Байкал), выполненного в августе 2024 г. Отобрано 33 пробы воды из заливов, рек Сарма и Зундук, источника Сурхай. Воды гидрокарбонатные кальциевые с низкой минерализацией (96–105 мг/дм³). Локальные отклонения в химическом составе воды рек и источнике обусловлены геологическими особенностями и антропогенным влиянием. Выявлено расхождение между полученными полевыми и лабораторными значениями рН, которое составило 2.2 ед. Это связано с физико-биохимическими изменениями, происходящими в пробе от момента отбора до поступления в лабораторию. Элементный состав пробы воды и осадка после ее фильтрации отражает терригенный снос, биогенную седиментацию и физико-химические условия среды.

Ключевые слова: *поверхностные и подземные воды, химический состав, ионно-солевой состав, геоэкологическая оценка, антропогенная нагрузка*

Abstract. This article presents the results of a geoecological study of the waters of the Maloe More Strait (Lake Baikal) conducted in August 2024. Thirty-three water samples were collected from bays, the Sarma and Zunduk rivers, as well as from the Surkhay spring. The waters were classified as bicarbonate-calcium type with low salinity (96–105 mg/dm³), which corresponds to ultra-fresh waters. Local deviations in the composition of the water in these rivers and the spring are due to geological features and anthropogenic impact. This study revealed discrepancies between field and laboratory pH measurements ($\Delta\text{pH} = 2.2$). This associated with physicochemical and biochemical changes occurring in the samples from the time of collection until laboratory analysis. The elemental composition of the water sample and the residue left after filtering it reflects terrigenous input, biogenic sedimentation, and the physicochemical conditions of the environment.

Keywords: *surface and ground water, chemical composition, ion-salt composition, geoecological assessment, anthropogenic load*

Пролив Малое Море расположен в средней части котловины Байкала, между о. Ольхон и западным побережьем озера. Благодаря небольшим глубинам, до 10 м, хорошей прогреваемости и защищенности от ветров береговая зона является местом интенсивного туристско-рекреационного использования [4]. В последние десятилетия в связи с активным развитием инфраструктуры, ростом числа туристов, увеличением нагрузок от водного транспорта и береговых рекреационных комплексов экосистема пролива испытывает возрастающее антропогенное давление. Это создает потенциальные риски ухудшения качества воды в озере, особенно в прибрежной зоне [2]. В этих условиях геоэкологическая оценка исследуемой территории, особенно водной среды, становится важнейшей задачей, позволяющей не только установить ее современное состояние, но и прогнозировать возможные негативные изменения [1, 2].

Данная работа является частью комплексного геоэкологического исследования геологической среды прибрежной территории оз. Байкал. Цель работы – рассмотреть химический и ионно-солевой состав, а также физико-химические параметры вод озера в 10 м от берега, рек, впадающих в пролив Малое Море, а также источников подземных вод, разгружающихся в пределах береговой зоны пролива, для определения влияния рекреационной деятельности человека. Экспедиционные работы выполнены в пределах береговой зоны пролива Малое Море в августе 2024 г. Точки отбора проб воды были расположены в прибрежной части заливов и бухт, а также устьях рек пролива Малое Море. Пробы воды ($n = 33$) отбирали с глубины 30–50 см в две чистые пластиковые емкости объемом 1 л каждая с предварительным ополаскиванием. Проба воды из первой бутылки использована для определения ионно-солевого состава и физико-химических параметров, из второй – для определения элементного состава. Физико-химические показатели воды (рН, Eh, температура) были определены непосредственно в точках отбора (*in situ*) с использованием портативного анализатора Эксперт-рН, который перед каждым выездом калибровали при помощи стандартных буферных растворов. Лабораторные измерения показателя рН выполнены потенциометрическим методом в день доставки проб в ЦКП «Геодинамика и геохронология»

(ИЗК СО РАН, г. Иркутск) с использованием лабораторного иономера Эксперт-001. Ионы K^+ , Na^+ , Mg^{2+} в пробах воды проанализирован методом пламенной фотометрии. Элементный анализ воды, предварительно профильтрованной на вакуумной установке SARTORIUS через фильтры с порами 0.45 мкм, выполнен рентгенофлуоресцентным методом. Осадок, оставшийся после фильтрования, определяли методом атомной эмиссии с индуктивно связанной плазмой. Анализ проб воды показал, что эти воды относятся к гидрокарбонатным кальциевым с низкой минерализацией – от 96 до 105 мг/дм³, что позволяет классифицировать эти воды по Е.В. Пиннекеру [3] как ультрапресные. Лишь в отдельных точках, таких как источник Сурхай, минерализация достигает 149 мг/дм³, что указывает на влияние литологии пород, в которых находится водоносный горизонт. Усредненная формула Курлова для вод пролива имеет следующий вид:

$$M_{0.92} \frac{HCO_3 90 SO_4 8}{Ca 62 Mg 23 Na 11} p 7.35 Eh 120 t 25 ^\circ C.$$

Установлено, что минерализация вод защищенных заливов изменяется в узких пределах – от 92 до 105 мг/дм³ (таблица). Катионный состав во всех пробах представлен преимущественно кальцием и магнием. Доля кальция в эквивалентной форме колеблется от 57 до 67 %, а магния – от 18 до 37 %. Анионный состав характеризуется абсолютным доминированием HCO_3^- , доля которого в эквивалентной форме достигает 86–90 %. Сульфаты и хлориды присутствуют в незначительных количествах, что типично для вод оз. Байкал [4]. Несмотря на значительное количество баз отдыха в пределах исследуемой территории, в большинстве проб содержание биогенных элементов (аммоний, нитриты, нитраты) находится на низком уровне ПДК согласно [2].

Как представлено в таблице, наибольшие отклонения полученных значений зафиксированы в пробах из рек Сарма и Зундук, а также из источника Сурхай. В р. Сарма отмечено повышенное содержание сульфатов (12 мг/дм³) и кремния (13 мг/дм³), а также максимальная доля магния среди всех проб, однако они не противоречат данным К.К. Вотинцева 1965 г. [1]. В р. Зундук также относительно других проб выявлены повышенные концентрации натрия (4.51 мг/дм³) и нитратов (0.89 мг/дм³), что может свидетельствовать о влиянии локальных антропогенных факторов (выпас крупнорогатого скота вдоль реки). В источнике Сурхай зафиксирована максимальная минерализация, высокие содержания кальция, магния, кремния и нитратов, что связано с литологией вмещающих пород (сланцы и граниты). Сравнительный анализ полевых и лабораторных определений рН выявил систематические и статистически значимые расхождения между двумя методами измерений. Полевые измерения показали более высокие значения рН – от 7.56 до 9.75 при среднем значении 8.47. Лабораторные определения дали существенно более низкие значения – от 7.15 до 8.85 со средним значением 7.58. Наиболее значимое расхождение ($\Delta pH = 2.2$ ед.) зафиксировано для проб из заливов Щучий и Хужирский, где полевые значения рН находятся в диапазоне 9.63–9.75, тогда как лабораторные не превысили 8.55–8.85. Выявленные расхождения обусловлены комплексом факторов. Интенсивный прогрев мелководных бухт и активный фотосинтез фитопланктона вызывали сдвиг значений рН в щелочную область в дневные часы. При транспортировке и хранении проб поглощение CO_2 из воздуха и дыхание микроорганизмов в герметичных емкостях привели к последующему снижению показателей рН до равновесных с атмосферой значений (около 8.3–8.4) [2, 4].

Анализ показателей рН и Eh выявил четкое разделение вод акватории и береговой зоны по физико-химическим условиям. В большей части проб зафиксирована окислительная обстановка ($Eh > 150$ мВ) и слабощелочная среда (рН 7.5–8.5), что характерно для хорошо аэрируемых вод Байкала. Отдельно выделены пробы из заливов Щучий и Халурийский, где обнаружены аномально высокие значения рН (до 9.75) при относительно низких значениях Eh (105–130 мВ). Такое сочетание свидетельствует о зонах активного фотосинтеза [4] – потребление CO_2 фитопланктоном повышает рН, а накопление органического вещества создает локальные восстановительные условия, снижающие Eh.

Средние концентрации основных ионов в водах пролива Малое Море и водотоках его бассейна в мг/дм³ (август 2024 г.)

Водный объект	NH ₄ ⁺	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Сумма ионов
Залив Бухта Радости-2	0.1	1.09	2.89	3.04	16.43	1.06	6	72	104.96
Залив Бухта Радости-3	0.1	1.05	3.09	3.16	15.43	1.06	6	69.56	101.36
Залив Бухта Базарка	0.1	1.03	3.02	3.3	15.63	1.22	6	70.68	102.66
Залив Хужирский	0.1	0.97	3.4	3.04	16.03	1.42	6	72	104.86
Залив Сарайский (о.Ольхон)	0.1	0.98	2.93	3.4	15.43	1.06	5	69.56	100.37
Залив Куркутский	0.1	0.94	2.92	3.77	15.23	1.06	5	70.78	102.71
Залив Бурун-Хагунский	0.1	0.77	2.68	3.4	14.43	1.06	6	67.73	99.08
Залив Мухорский	0.1	0.85	2.75	3.53	16.03	1.06	6	65.9	96.12
Залив с причалом парома (о. Ольхон)	0.1	0.97	3.1	2.68	16.03	1.06	5	70.17	99.01
Залив с причалом парома (п. Сахюрта)	0.1	0.94	2.96	3.4	15.63	1.06	5	70.78	99.78
Залив Шидинский	0.1	0.82	2.9	2.92	14.23	1.06	6	63.46	94.42
Залив Курминский	0.1	1.7	3.12	3.4	15.23	1.06	5	70.78	100.3
Залив Сурхай	0.1	1.01	2.91	3.53	15.43	1.06	5	68.95	97.89
Залив Баян-Шунген (о.Ольхон)	0.1	1.01	3	3.28	15.83	1.06	5	72.92	103.13
Залив Щучий	0.1	0.67	2.74	3.04	13.63	1.06	5	65.9	95.04
Залив Мандрахан	0.1	0.85	2.87	3.65	15.03	1.06	5	72	102.46
Залив Зугун-Хагун	0.1	0.86	2.89	3.28	14.83	1.06	6	68.34	100.27
Залив Саган-Нуге	0.7	0.94	2.88	3.65	15.03	1.06	6	68.95	101.21
Пролив Ольхонские ворота	0.1	0.72	2.82	3.4	13.51	1.06	5	62.04	92.57
Река Сарма	0.1	0.52	1.53	5.72	14.63	1.77	12	69.56	118.73
Река Зундук	0.1	0.81	4.51	2.43	14.03	2.13	7	61.02	110.82
Источник Сурхой	0.1	1.12	2.87	5.59	21.84	1.06	7	96.41	148.78

Отметим, что анализ пяти ключевых проб, отобранных в заливах и бухтах оз. Байкал, показал существенные различия в распределении химических элементов между твердой фазой (осадок после фильтрации) и жидкой формой (фильтрованная вода). Твердый осадок характеризуется высокими концентрациями преимущественно литогенных и биогенных элементов [4]. Максимальные значения зафиксированы в пробе с Ольхона (пляж Сарайский), в которой содержание алюминия составило 2393 ppm, железа – 1809 ppm, марганца – 42 ppm. Высокие концентрации алюминия и железа в осадке указывают на присутствие тонкодисперсных минеральных частиц, вероятно, терригенного происхождения. Повышенные содержания фосфора (до 54 ppm) и марганца (до 42 ppm) могут быть связаны с биогенной составляющей осадка (детрит, микроорганизмы).

Фильтрованная вода демонстрирует доминирование растворимых форм элементов. Во всех пробах вода характеризуется высокими концентрациями кальция (от 12 278 до 14 744 мкг/дм³), серы (от 1679 до 1899 мкг/дм³) и калия (от 851 до 1365 мкг/дм³). Содержание хлоридов значительно изменяется: от 168 мкг/дм³ (залив Щучий) до 1178 мкг/дм³ (залив Куркутский). Концентрации микроэлементов (медь, никель, цинк) в фильтрованной воде находятся на уровне ниже предела обнаружения (5 мкг/дм³).

Сопоставление результатов определения элементов в пробах воды и в твердом осадке показало четкое разделение геохимических ролей: осадок аккумулирует преимущественно литогенные элементы (Al, Fe) и элементы, сорбированные на взвеси (Mn, P, Co, Cr), тогда как фильтрованная вода обогащена растворимыми макроионами (Ca, K, S, Cl). В пробе,

отобранной на о. Ольхон, осадок содержит высокие концентрации Al и Fe, что может указывать на локальный снос терригенного материала. В пробе из залива Щучий отмечено повышенное содержание марганца в осадке (26 ppm) при относительно низких концентрациях железа, что связано с выходом марганцевых пород в береговой зоне залива.

Результаты исследования показали, что воды пролива Малое Море и прилегающих водотоков являются гидрокарбонатными кальциевыми с низкой минерализацией (ультрапресные), что соответствует природным условиям оз. Байкал. Локальные отклонения в ионно-солевом составе, выявленные в реках Сарма, Зундук и источнике Сурхай, обусловлены как геологическими особенностями территории, так и возможным антропогенным влиянием. Полученные расхождения между полевыми и лабораторными значениями pH связаны с интенсивными фотосинтетическими процессами в мелководных бухтах и последующими изменениями газового состава при транспортировке проб. Распределение элементов между взвешенной и растворенной фазами отражает сочетание терригенного сноса, биогенных процессов и физико-химических условий среды.

Полученные результаты являются частью работ по геоэкологической оценке береговой зоны оз. Байкал в рамках проекта № 075-15-2024-533 «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды».

Авторы благодарят к.г.-м.н., н.с. Мяжку И.Н., к.г.-м.н., н.с. Сарыг-оол Б.Ю. (ИГМ им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск) и к.т.н., с.н.с. Черкашина Е.А. (ИДСТУ им. В.М. Матросова СО РАН, г. Иркутск) за оказанную помощь в отборе проб в полевой экспедиции и обработке полученных данных. Анализ проб выполнен с применением авторских методик, разработанных в рамках гранта РФФИ № 25-77-30006.

Список литературы

1. Вотинцев К.К., Глазунов А.П., Толмачева А.П. Гидрохимия рек бассейна озера Байкал. М.: Наука, 1965. 288 с.
2. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2022 году». М.: Минприроды России, 2025. 404 с.
3. Основы гидрогеологии. Гидрогеохимия / С.Л. Шварцев, Е.В. Пиннекер, А.И. Перельман и др. Новосибирск: Наука, 1982. 287 с.
4. Русинек О.Т., Тахтеев В.В., Гладкочуб Д.П., и др. Байкаловедение: в 2 кн. Новосибирск: Наука, 2012. Кн. 1. 468 с.

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО В ГОРЯЧИХ ИСТОЧНИКАХ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

Потурай В.А.^{1,2}, Зиппа Е.В.¹, Украинцев А.В.^{1,3}, Федоров И.А.^{1,4}, Торопов А.С.⁵

¹Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
СО РАН, Томск, zipraev@ipgg.sbras.ru

²Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан,

³Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ

⁴Институт природных ресурсов, экологии и креологии СО РАН, Чита

⁵Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

Аннотация. В настоящей статье представлены оригинальные данные по составу и молекулярно-массовому распределению органических соединений в горячих источниках Байкальской рифтовой зоны. Методами твердофазной экстракции и газовой хромато-масс-спектрометрии зафиксировано 211 соединений, среди которых преобладают нормальные и изоалканы, ароматические углеводороды и эфиры карбоновых кислот. Концентрация $C_{\text{орг}}$ колеблется в пределах от 0.05 до 3.94 мг/дм³. Установленные органические соединения имеют преимущественно бактериальное происхождение.

Ключевые слова: органическое вещество, горячие источники, Байкальская рифтовая зона, генезис

Abstract. Original data on the composition of organic compounds in hot springs of the Baikal rift zone were presented. 211 compounds were detected using solid-phase extraction and gas chromatography-mass spectrometry methods. Normal and isoalkanes, aromatic hydrocarbons and carboxylic acid esters are predominant. The concentration of C_{org} ranges from 0.05 to 3.94 mg/L. The identified organic compounds are predominantly of bacterial origin.

Keywords: organic matter, hot springs, Baikal Rift Zone, genesis

Изучение органического вещества (ОВ) в горячих источниках является важным аспектом при геохимических исследованиях гидротермальных систем, который позволит выявить механизмы преобразования ОВ под действием высоких температур и давления и определить роль органических компонентов в процессах взаимодействия в системе вода – порода – газ – ОВ. Кроме этого, данные по органическому составу лечебных вод могут быть использованы для изучения влияния углеводородов (УВ) на здоровье человека или выявление соединений – индикаторов техногенного загрязнения.

Ранее нами проводились исследования органических соединений в горячих источниках Дальнего Востока [2, 3] и Сибири [4, 5], однако комплексное исследование ОВ в большом количестве горячих источниках центральной части Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) не проводилось. Цель нашего исследования – выявление и описание растворенной органической фракции в термальных водах центральной части БРЗ и обоснование происхождения установленных УВ и их производных.

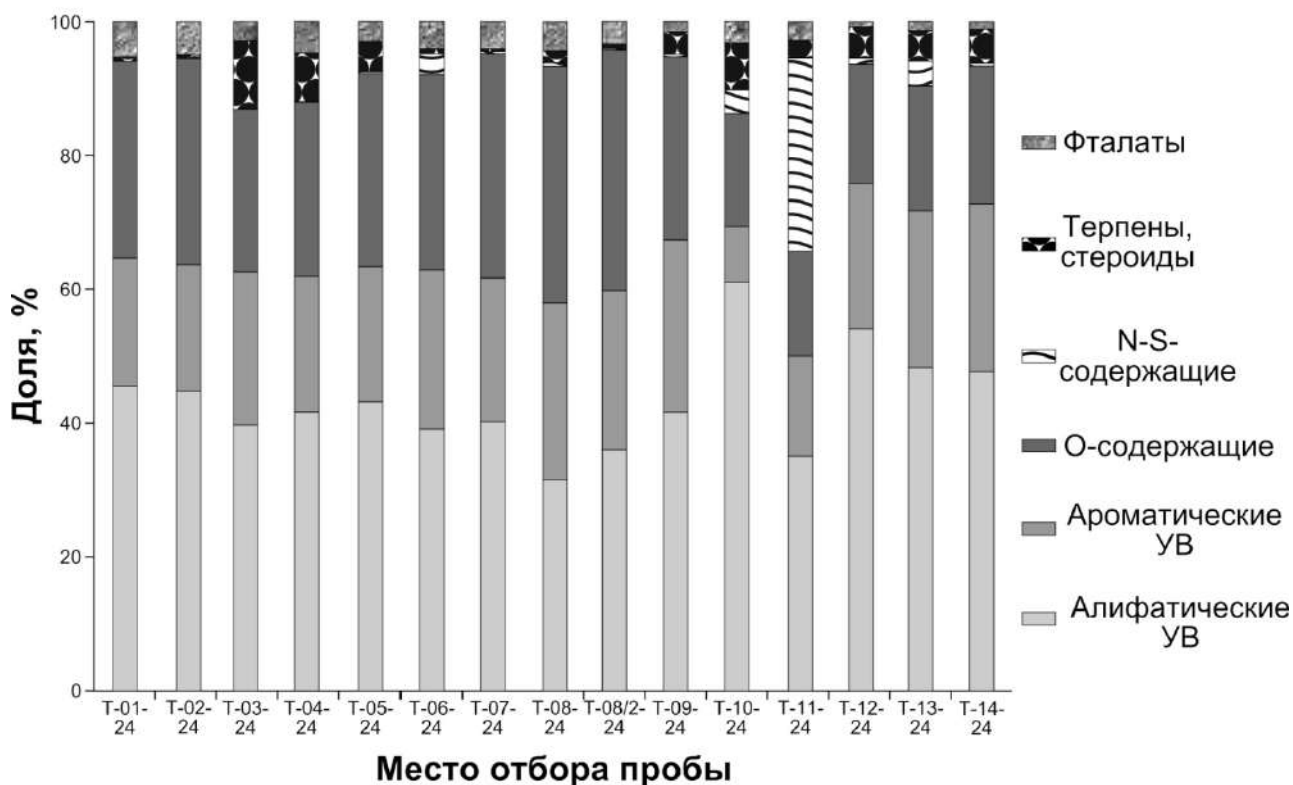
Для исследования состава ОВ были выбраны 15 горячих источников центральной части БРЗ с температурой 19.8–75.6 °С. Район исследования расположен в Республике Бурятия. Исследуемая территория сложена меловыми и неоген-четвертичными отложениями. Большая часть Баргузинского хребта представлена гранитоидными батолитами с изолированными включениями метаморфизованных карбонатных пород, песчано-сланцевыми и терригенно-вулканическими отложениями, кристаллическими сланцами и гнейсами кембрийского возраста. Икацкий хребет сложен различными интрузивными и осадочно-метаморфизованными породами докембрийского и нижнепалеозойского возраста [1]. Подробно обо всех 15 опробованных горячих источниках, их химическом и газовом составе можно посмотреть в работе [14]. Исследованные воды являются пресными, слабощелочными и щелочными и относятся к сульфатно-натриевому и гидрокарбонатно-сульфатно-натриевому типу. Для сульфатно-натриевых вод среди газов преобладает азот, а для гидрокарбонатно-сульфатно-натриевых – азот и метан [14].

Экстракты органических соединений были получены методом твердофазной экстракции непосредственно в полевых условиях. Качественный анализ осуществлялся методом капиллярной газовой хромато-масс-спектрометрии в лаборатории ИКАРП ДВО РАН

(г. Биробиджан). Растворенный углерод органический ($C_{орг}$) анализировался методом окисления $K_2Cr_2O_7$ и спектрофотометрией на приборе Shimadzu UV-1900i на кафедре радиохимии Московского государственного университета.

Растворенный углерод органический. Концентрация $C_{орг}$ в исследуемых термальных водах низкая и в среднем составляет 0.7 мг/дм^3 , что косвенно может указывать на незначительное поступление ОВ с поверхности, от растительного детрита и гумуса. Вероятно, основная часть ОВ имеет автохтонное происхождение, то есть образована непосредственно в самих термальных источниках. Только в трех источниках концентрация $C_{орг}$ превышает 1 мг/дм^3 , достигая 1.41 мг/дм^3 в источнике «Золотой Ключ», 2.19 мг/дм^3 в источнике «Змеиный» и 3.94 мг/дм^3 в источнике «Кулиные болота». Методом статистического анализа была зафиксирована сильная положительная зависимость между концентрацией $C_{орг}$ и долей терпенов ($r = 0.72$). Так как терпены считаются биогенными соединениями, поступающими преимущественно из растительных остатков, такая прямая зависимость указывает на небольшой вклад растительности в происхождение ОВ.

Органическое вещество средней летучести. Всего в термальных водах БРЗ зафиксировано 211 органических соединений с молекулярной массой от 92 до 506 дальтон. Установленные ОС были отнесены к 18 гомологическим рядам. Преобладают гомологические ряды линейных и разветвленных алканов и эфиров, а также класс ароматических УВ (рисунок).



Основные классы ОВ, установленного в исследуемых горячих источниках БРЗ.

К изоалканам относятся 56 соединений с числом атомов углерода от C_{10} до C_{20} , которые занимают в среднем 25 % от состава ОВ. При этом основная доля приходится на низкомолекулярные изоалканы C_{12} – C_{15} . Такое разнообразие низкомолекулярных изоалканов и их значительная доля в составе ОВ может указывать на микробиологическое преобразование ОВ в этих водах. Поскольку концентрация изоалканов выше (в 1.5–2 раза), чем н-алканов, в термальных водах наблюдается высокая бактериальная активность [7]. Среди алкенов также преобладают низкомолекулярные гомологи состава C_{13} – C_{20} . Короткоцепочечные алкены ($< C_{22}$), вероятно, происходят из водорослей и зоопланктона [9]. Отсутствие длинноцепочечных УВ исключает возможность вклада наземных растений или гуминовых

кислот [8], что говорит о незначительном влиянии поверхностного ОВ, поступающего от растительного детрита, и автохтонном происхождении ОВ в термальных водах. Нафтены и диметоксикалканы встречаются эпизодически и с невысоким относительным содержанием (0.3–2.6 и 0.3–0.7 % соответственно).

Среди *n*-алканов установлены гомологи состава $n\text{-C}_9\text{--C}_{36}$, с относительным содержанием от 8.7 до 30.9 %. Наблюдается резкое преобладание низкомолекулярных гомологов, что характерно для гидротермально измененного ОВ [13]. В пользу бактериального вклада в образование УВ свидетельствует резкое преобладание четных предельных УВ над нечетными гомологами в группе $n\text{-C}_{15}\text{--C}_{22}$. Обращает на себя внимание группа гомологов $n\text{-C}_9\text{--C}_{14}$, доля которых в составе *n*-алканов занимает от 34.4 до 51 %. В этой области *n*-алканов отсутствует дискриминация по четности/нечетности атомов углерода в молекуле, что указывает на термогенное происхождение части предельных УВ в горячих источниках БРЗ.

Ароматические УВ с одним бензольным кольцом в исследуемых термальных водах имеют невысокую молекулярную массу (преимущественно от 92 до 134 дальтон), являясь низкомолекулярными компонентами. Арены, вероятно, образовались в результате термогенных процессов, с учетом высокой температуры воды. ПАУ, содержащие два бензольных кольца в своей структуре, представлены исключительно нафталином и большим количеством его изомеров. Эти соединения могут формироваться в результате преобразования осадочного ОВ. Гетероароматические УВ более распространены в природе, чем арены или ПАУ. Например, бензоловый спирт и бензальдегид, установленные в исследуемых горячих источниках, содержатся во многих растениях, особенно в эфирных маслах. Однако остальные гетероароматические соединения (например, бензотиазол) не встречаются в живых организмах, и их присутствие может быть связано с термическим преобразованием осадочного ОВ [6, 11].

О-содержащие компоненты в исследуемых источниках занимают от 16 до 36 %. Основная часть установленных соединений относится к низкомолекулярным компонентам с числом атомов углерода от C_6 до C_{19} . Они характерны для живого вещества, что также указывает на биогенный, преимущественно бактериальный (учитывая преобладание низкомолекулярных соединений), генезис [10, 12]. N-содержащие компоненты, установленные в исследуемых термальных водах, преимущественно содержат в своей структуре ароматическое кольцо, поэтому отнесены к ряду гетероароматических УВ. Среди алифатических соединений, которые содержат атом азота, установлены только два компонента – *O*-decylhydroxylamine, 13-Docosenamide, (Z)-. В целом, они не сильно распространены в горячих источниках БРЗ. Среди S-содержащих соединений (кроме бензотиазола – гетероароматического УВ) установлена только молекулярная сера в виде цикла с разным числом атомов в своей структуре (6 и 8 атомов). Ее присутствие зафиксировано только в 5 горячих источниках из 15, с относительным содержанием 0.9–3.7 % от состава ОВ, и только в одном термопроявлении (Т-11-24) ее содержание резко увеличивается и достигает 28.9 %.

Терпены и стероиды считаются представителями биогенных компонентов, которые широко распространены в биосфере и синтезируются живыми организмами. Среди терпенов идентифицировано 12 компонентов, относительное содержание которых от 0.6 до 10.2 %. Этот ряд установлен во всех без исключения исследованных горячих водах, при этом в половине из них концентрация терпенов превышает долю 3 % от состава ОВ. Стероиды (6 соединений), найденные только в четырех источниках в невысоких относительных концентрациях (0.1–4.2 %), также являются представителями живого вещества, свидетельствующими о биогенном происхождении части ОВ в горячих источниках. Среди идентифицированных кислородсодержащих компонентов во всех без исключения исследуемых горячих водах были установлены шесть эфиров фталевой кислоты с относительным содержанием от 0.7 до 5.3 %. Эти соединения обычно рассматриваются как типичные загрязнители природных сред в результате антропогенного воздействия, так как являются универсальными пластификаторами

и широко используются в пластмассовых и резиновых изделиях. Вероятно, они проникли в термальные воды в результате небольшого техногенного загрязнения.

Всего в исследуемых водах идентифицировано 211 УВ и их производных, которые были отнесены к 18 гомологическим рядам. Максимальных относительных концентраций достигают гомологические ряды нормальных и изоалканов, занимающие в среднем 40 % от состава ОВ, а также ароматических УВ (21 %) и эфиров карбоновых кислот (17 %). Концентрация $C_{орг}$ не велика и колеблется в пределах от 0.05 до 3.94 мг/дм³ при среднем значении 0.7 мг/дм³. Установленные органические соединения имеют преимущественно бактериальное происхождение. Часть ароматических УВ, так же как и низкомолекулярные *n*-алканы, сформировалась в результате термокаталитического преобразования органических остатков.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-77-10035, <https://rscf.ru/en/project/24-77-10035/>).

Список литературы

1. Лунина О.В. Разломы плиоцен-четвертичной активизации юга Восточной Сибири и их роль в развитии сейсмически индуцированных геологических процессов: Дис. ... докт. геол.-минерал. наук. Иркутск, 2015. 359 с.
2. Потурай В.А. Органическое вещество и молекулярно-массовое распределение углеводородов в Анненских термальных водах (Дальний Восток, Россия) // Геология и геофизика. 2022. Т. 63, № 10. С. 1352–1368.
3. Потурай В.А. Органическое вещество в гидротермальных системах разных типов и обстановки // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 11. С. 6–16.
4. Украинцев А.В., Плюсин А.М. Аليفатические углеводороды углекислых минеральных и азотных термальных вод Западного Забайкалья // Мат-лы четвертой Всерос. конф. с международ. участием «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами». Улан-Удэ: Изд-во во БНЦ СО РАН, 2020. С. 179–183.
5. Украинцев А.В., Плюсин А.М., Чернявский М.К. Формирование газового, микроэлементного состава и растворенных органических веществ в железистых минеральных водах Западного Забайкалья // Геохимия. 2024. Т. 69, № 6. С. 580–594.
6. Fekete J., Sajgó C.S., Kramarics Á., Eke Z.S., Kovács K., Kárpáti Z. Aquathermolysis of humic and fulvic acids: simulation of organic matter maturation in hot thermal waters // Org. Geochem. 2012. Vol. 53. P. 109–118.
7. García-Sánchez B.E., Vara-Castro G.M., Kretzschmar Th., Sánchez-Avila J.I. Organic compounds in surface and groundwaters in the surrounding of a Mexican geothermal reservoir; case study Los Humeros, Puebla // Applied Geochemistry. 2022. Vol. 147. № 105442.
8. Gonzalez-Barreiro C., Cancho-Grande B., Araujo-Nespereira P., Cid-Fernandez J.A., Simal-Gandara J. Occurrence of soluble organic compounds in thermal waters by ion trap mass detection // Chemosphere. 2009. Vol. 75. P. 34–47.
9. Grimalt J., Albaiges J. Sources and occurrence of C_{12} - C_{22} *n*-alkane distributions with even carbon-number preference in sedimentary environments // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1987. Vol. 51. P. 1379–1384.
10. Hunt J.M. Petroleum geochemistry and geology. San Francisco: W.H. Freeman and Company, 1979. 617 p.
11. Nye J.J., Shock E.L., Hartnett H.E. A novel PARAFAC model for continental hot springs reveals unique dissolved organic carbon compositions // Org. Geochem. 2020. Vol. 141. № 103964.
12. Shorland F.B. Occurrence of fatty acids with uneven-numbered carbon atoms in natural fats // Nature. 1954. Vol. 174. P. 603.
13. Sánchez-Avila J.I., García-Sánchez B.E., Vara-Castro G.M., Kretzschmar T. Distribution and origin of organic compounds in the condensates from a Mexican high-temperature geothermal field // Geothermics. 2021. Vol. 89. № 101980.
14. Zippa E.V., Ukraintsev A.V., Chernyavskii M.K., Fedorov I.A., Poturay V.A., Domrocheva E.V., Mukhortina N.A. Thermal waters in the Central part of Baikal Rift Zone: hydrogeochemistry and geothermometry (Republic of Buryatia, Russia) // Geothermics. 2025. Vol. 130. № 103317.

СТРУКТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ ОТНОШЕНИЙ И КОНЦЕНТРАЦИЙ ИЗОТОПОВ УРАНА В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ВНУТРЕННЕЙ АЗИИ

Рассказов С.В.^{1,2}, Чебыкин Е.П.¹, Ильясова А.М.¹, Чувашова И.С.^{1,2}

¹*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, rassk@crust.irk.ru,*

²*Иркутский государственный университет, Иркутск, kaf-dinamgeol@mail.ru*

Аннотация. По результатам выполненных сравнительных аналитических исследований подземных вод Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) и сопредельных территорий Внутренней Азии выявлены районы с проявлением и отсутствием фактора гидрогенного концентрирования урана. К первым относятся впадины БРЗ и фундамент на ее северном фланге, а также впадина Сунляо СВ Китая, ко второй – нижний гидрогеодинамический этаж земной коры в Читинском Забайкалье и Монголии. Крупное Хиагдинское месторождение гидрогенного урана образовалось в погребенных кайнозойских палеодолинах вулканоактивной части субмеридионального Ципа-Муяканского трансензионного сегмента Байкальской рифтовой системы (БРС). Подземные воды осевых впадин БРЗ в различной степени подвергаются влиянию глубинных флюидов, несущих равновесный уран. В подземных водах из эвапоритовых карбонатных слоев осадочного чехла Сибирской платформы изотопное отношение U-234/U-238 (в единицах активностей) достигает 16.

Ключевые слова: *неотектоника, Внутренняя Азия, гидрогеохимия, мониторинг, землетрясения, уран*

Abstract. From comparative analytical studies of groundwater in the Baikal Rift Zone (BRZ) and adjacent territories of Inner Asia, zones with and without hydrogenic uranium concentration were identified. The former include the BRZ basins and basement on its northern flank, as well as the Songliao Basin of NE China, while the latter includes the lower hydrogeodynamic stage of the Earth's crust in the Chita Transbaikalia and Mongolia. The large Khiagda hydrogenetic uranium deposit formed in buried Cenozoic paleovalleys of the volcanic part of the north-south Tsipa-Muyakan transtensional segment of the Baikal Rift System (BRS). Groundwater in the axial basins of the BRZ are affected to varying degrees by deep fluids containing equilibrium uranium. In groundwater from evaporite carbonate layers of the sedimentary cover in the Siberian platform, the isotopic ratio U-234/U-238 (in activity ratio) is as high as 16.

Keywords: *neotectonics, Inner Asia, hydrogeochemistry, monitoring, earthquakes, uranium*

Подземные воды систематизируются в основном по содержаниям растворенных химических элементов и газов [4]. Специфика современных региональных процессов, протекающих в земной коре, отражается в концентрациях ^{238}U , ^{234}U и отношении U-234/U-238 в подземных водах. В результате перехода растворимой (окисленной) формы уранил-иона в слабо-растворимую (более восстановленную) форму образуются гидрогенные залежи урана. В материнских породах возрастом более 1 млн лет уран, как правило, имеет равновесный изотопный состав, в котором отношение удельных активностей изотопов U-234/U-238 равно единице, тогда как массовое (атомное) отношение этих изотопов равно 5.47×10^{-5} [8]. Ниже это отношение активностей U-234/U-238 обозначено авторами как ОА4/8. Нередко, однако, в подземных водах регистрируются значения ОА4/8, отличающиеся от равновесного [10, 11].

Изотопное равновесие урана в подземных водах может быть нарушено по разным причинам, которые выясняются в частных исследованиях подземных вод территорий. В бореальной области Евразии большие избытки U-234 образуются вследствие накопления в пленочной влаге многолетнемерзлых грунтов в ледниковые периоды с высвобождением при их таянии [7]. В умеренных широтах юга Сибири, Монголии и СВ Китая фактор накопления U-234 в многолетнемерзлых породах не проявляется. В этих условиях основное значение имеет контроль отношений и концентраций изотопов урана в подземных водах, развития современных процессов в земной коре и литосферной мантии, в том числе сейсмогенных деформаций в активных разломах, сопровождающихся подъемом глубинных флюидов. Цель работы – выявить структурный контроль отношений и концентраций изотопов урана в подземных водах Внутренней Азии.

В авторской базе данных содержатся результаты анализов около 4400 проб, выполненных по подземным и поверхностным водам БРЗ и сопредельных новейших структур Внутренней Азии по единой методике в период с 2012 до 2025 г. Для определения элементного состава вода при отборе фильтруется через шприцевую фильтр-насадку (0.45 мкм) в

предварительно взвешенную пробирку Эппендорфа (2 мл), содержащую ультрачистую 70%-ную азотную кислоту. В растворе определяется содержание 72 химических элементов, в том числе концентрация U, методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce. Для определения ОА4/8 проба воды (до 400 мл) обогащается на ионообменной смоле. Полная характеристика методики приводится в работе [8].

Байкальская рифтовая зона (БРЗ), представляющая собой полосу поднятий и впадин, протянувшуюся на 1800 км [1], образовалась в плиоцене и квартере как ядро Байкальской рифтовой системы (БРС), в которую объединяются впадины и вулканические поля, формировавшиеся в позднем кайнозое на более обширной территории Внутренней Азии [5]. На современном этапе развития неотектонических процессов сейсмогенные деформации БРС распространяются за структурно-геоморфологические границы БРЗ.

По латерали БРЗ различаются осевые рифтовые долины (впадины), обрамляющие их поднятия и периферические прогибы. Последние оформились как структурно-геоморфологические элементы БРЗ в плиоцене и квартере. Периферический Предбайкальский прогиб, сформировавшийся на краю Сибирской платформы северного фланга БРЗ, имеет более длительную историю накопления осадочных отложений, начинающуюся с пограничных слоев мела и палеогена. Подобный периферический прогиб протягивается вдоль южного фланга БРЗ, подчеркивая плиоцен-четвертичный переход от БРЗ к Селенгино-Витимскому прогибу, в котором, так же как в Предбайкальском прогибе, осадочные отложения накапливались начиная с пограничных слоев мела и палеогена. В ходе дистального развития структуры БРЗ обособились процессы ее центральной, северо-восточной и юго-западной части. В дистальном делении структуры БРЗ важнейшую роль играет геодинамический переход от растягивающейся Южно-Байкальской впадины к сжимающейся восточной части Тункинской долины. Этот переход явился следствием ослабления литосферной структуры вдоль Метео-Култукской магматической зоны 18–12 млн лет назад, которое повлекло за собой рифтогенное откалывание углового фрагмента фундамента южного края Сибирского палеоконтинента по Обручевскому разлому с его опусканием в Южно-Байкальскую впадину. Литосфера Метео-Култукской магматической зоны плавилась в широком интервале глубин вследствие даламинации утолщенной корневой части земной коры Южно-Байкальского орогена, образовавшегося в юре и существовавшего на месте Южно-Байкальской впадины в позднем мелу и палеогене.

Осевая Тункинская долина юго-запада БРЗ в настоящее время испытывает сжатие на окончаниях при растяжении в центральной части долины (т.е. в Тункинской впадине). Минеральные воды разного газового состава пространственно связаны во впадине с четвертичным вулканизмом и характеризуются аномально высоким изотопным отношением $^3\text{He}/^4\text{He}$ (10^{-5}) [13, 14], соответствующим значению этого отношения в оливинах из ксенолитов вулканических пород, извлеченных расплавами из слоя коромантийного перехода и доставленных ими на земную поверхность. Минеральные воды разного газового состава содержат компоненты с равновесным U. В радоновых водах курорта Нилова Пустынь определяется высокое значение ОА4/8 (до 3.24). Равновесный уран подземных вод Тункинской впадины служит показателем воздействия на их глубинный резервуар окисленных флюидов, поднимающихся из области коромантийного перехода, а нарушение равновесия свидетельствует о смене воздействия окисленных флюидов восстановленными. Равновесный U воспринимается в качестве такого же признака вхождения глубинного флюида в тункинские подземные воды, как и аномально высокое отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$.

В подземных водах осевой Баргузинской рифтовой долины северо-востока БРЗ отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ ниже, чем в подземных водах Тункинской впадины [14]. Значения ОА4/8 в подземных водах этой долины находятся в интервале 1.05–2.62. Состав урана, близкий к равновесному, определяется в выходах наиболее высокотемпературных вод источников Гусиха и Алла. По значению ОА4/8, близкому к 1, эти подземные воды Баргузинской долины подобны подземным водам Тункинской впадины, имеющим равновесный уран. В целом

ОА4/8 подземных вод осевых структур БРЗ не превышает 4, а концентрация U не превышает первые мкг/дм³.

На северном фланге БРЗ подземные воды имеют контрастные отношения и концентрации изотопов урана. Эти показатели подземных вод территории Восточного Саяна, сопредельной с БРЗ, подобны показателям подземных вод осевых рифтовых долин. В подземных водах кристаллического фундамента и верхней (юрской) части осадочного чехла Иркутского амфитеатра на Сибирской платформе они также подобны показателям подземных вод осевых долин БРЗ. В состав подземных вод Предбайкалья входит компонент глубинной воды Южно-Байкальского резервуара (ОА4/8=1.96, U=0.45 мкг/дм³). В минеральной воде, поступающей из кембрийских эвапоритовых карбонатных отложений в 300-метровую Олхинскую скважину, ОА4/8 менялось с течением времени. В июне 2013 г. это отношение составляло 11.82. К июню 2018 г. оно последовательно возросло до 15.92. К настоящему времени ОА4/8 слегка снизилось. Изотопное отношение возрастало вследствие усиления растворения карбоната. Минеральная вода обогащалась атомами отдачи ²³⁴U подобно другим растворяющимся компонентам, тогда как вариации ОА4/8 осложнялись зависимостью растворения U от окислительно-восстановительного потенциала.

На южном фланге БРЗ (Забайкалье и сопредельная Монголия) отношения и концентрации изотопов урана подземных вод существенно отличаются от урановых компонентов подземных вод БРЗ. На этих территориях находятся месторождения урана, образовавшиеся в позднемезозойскую и кайнозойскую урановорудные эпохи [3, 12]. В отношениях и концентрациях изотопов урана подземных вод территории отражается перераспределение этого металла в горных породах с его гидрогенным концентрированием в настоящее время. Содержание урана в углекислых минеральных газлирующих водах существенно превышает ПДК и составляет более 100 мкг/дм³. Для подземных вод рассчитывается температура растворения кремния и на основе регионального геотермического градиента 25 °С/км определяется глубинный эквивалент температуры. По результатам выполненных расчетов подземные воды Читинского Забайкалья и Монголии с контрастным содержанием U воспринимаются как комплементарные составляющие процессов обогащения – обеднения ураном, протекающих в глубинном интервале 2.4–4.3 км, тогда как на глубине менее 2.4 км процессы гидрогенного концентрирования урана отсутствуют. Большие скопления гидрогенного урана Хиагдинского месторождения Витимского плоскогорья [2] образовались в погребенных впадинах, которые, с одной стороны, находятся в Селенгино-Витимском прогибе, пространственно перекрывающемся с южным периферическим прогибом БРЗ, с другой стороны, погребенные впадины составляют южное окончание субмеридионального Ципа-Муяканского трансензионного сегмента БРС с вулканизмом, охватывающим временной интервал с 16 до 0.6 млн лет назад [6]. Отношения и концентрации изотопов урана подземных вод Северо-Восточного Китая, в северной части впадины Сунляо и в породах ее фундамента, также характеризуются широкими вариациями ОА4/8. Концентрация U в подземных водах не превышает первые мкг/дм³. Выделяются четыре группы составов: I – минеральные воды территории четвертичного вулканизма Удаляньчи, на которой произошли исторические извержения вулканов Лаохейшан и Хуошаошан (общая минерализация ОМ = 1.3–2.0 мг/дм³) с низким ОА4/8 и повышенной концентрацией U, близкие по урановым компонентам менее минерализованные воды (ОМ = 530–750 мкг/дм³) других территорий; II – пресные подземные и поверхностные воды Удаляньчи (ОМ в основном 190–380 мкг/дм³) с низким ОА4/8 и низкой концентрацией U, близкие по этим характеристикам подземным водам других территорий, часто с более высокой общей минерализацией; III – пресные и ультрапресные воды территории четвертичного вулканизма Мен Лу (ОМ менее 400 мкг/дм³) с повышенным ОА4/8 (2.0–3.5) и низкой концентрацией U (менее 0.16 мкг/дм³), близкие по отношениям и концентрациям изотопов урана подземным водам других территорий, и IV – пресные воды территории четвертичного вулканизма Сяогули с высоким ОА4/8 (1.93–11.7) при обратной корреляции с U в широком диапазоне его концентраций. Минеральные углекислые газлирующие воды вулканического

поля Удаляньчи в целом обогащены ураном относительно пресных подземных вод этой территории и других районов СВ Китая. Имеются подземные воды с ультранизким содержанием U (до 0.0005 мкг/дм³), но, в отличие от подземных вод Читинского Забайкалья, здесь отсутствуют подземные воды с содержанием U выше ПДК.

По результатам выполненных сравнительных аналитических исследований подземных вод мы приходим к выводу о структурном контроле урановых компонентов в БРЗ и на сопредельных территориях Внутренней Азии:

1) в осадочных толщах и фундаменте осевых впадин БРЗ уран не концентрируется, подземные воды в различной степени подвергаются влиянию глубинных флюидов, несущих равновесный уран, значения ОА4/8 подземных вод не превышают 4;

2) на северном фланге БРЗ водородный уран также не концентрируется. В Восточном Саяне отношения и концентрации изотопов урана подземных вод подобны отношениям и концентрациям изотопов урана подземных вод осевых долин БРЗ. Подземные воды Предбайкальского периферического прогиба БРЗ имеют весьма контрастные изотопные характеристики урана. В осадочном чехле Сибирской платформы ОА4/8 подземных вод из эвапоритовых карбонатных слоев возрастает до 16;

3) на южном фланге БРЗ образовались большие скопления водородного урана Хиагдинского месторождения в погребенных кайнозойских палеодолинах вулканогенной части субмеридионального Ципа-Муяканского трансформационного сегмента БРС;

4) в Читинском Забайкалье и Монголии уран был мобилизован в мезозое и кайнозое. Здесь развиваются современные процессы водородного перераспределения урана с его концентрированием на нижнем гидрогеодинамическом этаже земной коры;

5) во впадине Сунляо СВ Китая уран не концентрируется, значения ОА4/8 в подземных водах районов четвертичного вулканизма достигают 11.7.

Работа выполняется по проекту ИЗК СО РАН FWEF-2026-0010.

Список литературы

1. Логачев Н.А. Вулканогенные и осадочные формации рифтовых зон Восточной Африки. М.: Наука, 1977. 183 с.
2. Лучинин И.И., Пешков П.А., Дементьев П.К. и др. Месторождения урана в палеодолинах Зауралья и Забайкалья // Разведка и охрана недр. 1992. № 5. С. 12–15.
3. Миронов Ю.Б. Уран Монголии. Второе издание. СПб, 2006. 328 с.
4. Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Ломоносов И.С., Колдышева Р.Я., Диденко А.А., Шерман С.И. Гидрогеология Прибайкалья. М.: Наука, 1968. 170 с.
5. Рассказов С.В. Магматизм Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Наука, 1993. 288 с.
6. Рассказов С.В., Чувашова И.С. Вулканизм и трансформация на северо-востоке Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2018. 383 с.
7. Мониторинг урановых компонентов в подземных водах Аршана в 2012–2024 гг.: отслеживание парагенетических (гидрогеохимических и сейсмических) процессов в Байкальской рифтовой системе // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 3. С. 65–112.
8. Токарев И.В. Изотопная реконструкция происхождения, эволюции и оценка текущего состояния водно-ледовых объектов. Дис. ... докт. геол.-мин. наук (в двух томах). Иркутск, 2025. Т. 1. 224 с., Т. 2. 172 с.
9. Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир (перевод с англ.), 1989. 590 с.
10. Чебыкин Е.П., Куликова Н.Н., Лихошвай Е.В., Сутурин А.Н. Геохимический метод оценки влияния загрязнённых стоков на водные объекты на примере г. Слюдянка, р. Похабиха и Южного Байкала // Геосферные исследования. 2024. № 4. С. 107–136. DOI: 10.17223/25421379/33/7.
11. Чердынцев В.В. Уран-234. М.: Атомиздат, 1969. 308 с.
12. Чердынцев В.В. Ядерная вулканология. М.: Наука, 1973. 208 с.
13. Шатков Г.А. Стрельцовский тип урановых месторождений // Региональная геология и металлогения. 2015. № 63. С. 85–96.
14. Pinneker E.V., Pissarskiy B.I., Pavlova S.E. Helium isotope data for groundwater in the Baikal rift zones // Isotopes Environ. Health Studies. 1995. Vol. 31. P. 97–106.
15. Polyak B.G. Helium isotopes in the ground fluids of the Baikal Rift and its surroundings: Contribution to continental rifting geodynamics // Russian Journal of Earth Sciences. 2003. Vol. 5, No. 1. P. 45–66.

СОВРЕМЕННЫЕ ГИДРОГЕННЫЕ КАРБОНАТНЫЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ НОВООБРАЗОВАНИЯ В ПРЕДЕЛАХ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КОЛЫВАНЬ-ТОМСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ЗОНЫ

Садиров М.Ш.¹, Вологодина И.В.¹, Дутова Е.М.^{1,2}, Асочакова Е.М.¹, Каримова Д.Б.³

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск,
sadirovmuhriddin02@gmail.com

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

³Международный центр устойчивого энергетического развития под эгидой ЮНЕСКО,
Москва

Аннотация. В результате комплексного изучения получены данные о морфологии, структуре и вещественном составе современных природных карбонатных минеральных новообразований (травертины и почвенные карбонаты), сформировавшихся при участии подземных вод в пределах Колывань-Томской складчатой зоны.

Ключевые слова: подземные воды, минеральные новообразования, травертины, почвы, кальцит, карбонаты

Abstract. As a result of comprehensive studies, data on the morphology, structure, and material composition of modern natural carbonate mineral formations (travertines and soil carbonates) formed with the participation of groundwater within the Kolyvan-Tomsk folded zone have been obtained.

Keywords: groundwater, mineral neoformations, travertines, soils, calcite, carbonates

Под современными гидрогенными минеральными новообразованиями авторы понимают минеральные агрегаты, сформированные при участии подземных вод, которые характеризуются широким региональным распространением в континентальных блоках земной коры и в явном виде не связаны с магматизмом [1]. Минералообразование происходит при изменении термодинамических условий (температура, давление, газовый режим) и описывается теорией геохимических барьеров. Процессы гидрогенного минералообразования широко развиты как в природных, так и в природно-техногенных системах [2, 5, 11, 12]. К гидрогенным минеральным новообразованиям природного генезиса относятся травертиновые постройки, состоящие преимущественно из кальцита, с примесью гидроксидов железа, марганца, терригенных и глинистых минералов. Они включают гидрогенные карбонаты в почвенных горизонтах, образующиеся «за счет аккумуляции из латерального и восходящего потока минерализованных гидрокарбонатных вод», а также педогенные карбонаты, формирующиеся при участии почвенных растворов [4]. Среди разнообразных форм карбонатных стяжений в почвах равнин Западной Сибири встречаются плотные карбонатные образования – «белоглазка» и «журавчики», в горных почвах Алтая широко развиты корочки (друзы), покрывающие обломки пород. Оксидно-гидроксидные осадки зафиксированы в местах выхода умеренно пресных и собственно пресных вод Салаира и Колывань-Томской складчатой зоны, характерным признаком которых является относительное обогащение железом [5, 11]. В почвах также образуются оксидно-гидроксидные новообразования – ортштейны, железо-марганцевые микроконкреции, которые являются чувствительными индикаторами ведущих почвообразовательных процессов [9]. Объектами исследования являются процессы карбонатообразования в зоне гипергенеза на примере травертинов и почвенных карбонатов в пределах Колывань-Томской складчатой зоны [7, 8].

Целью данной работы является сравнительная морфологическая характеристика педогенных карбонатов и травертинов на основе данных растровой электронной микроскопии (РЭМ). Изучение гидрогенных карбонатных новообразований позволит выявить закономерности формирования парагенезисов современных гипергенных образований (геохимические типы подземных вод и ассоциаций минералов равновесной вторичной твердой фазы). Согласно имеющимся представлениям карбонатообразование в зоне гипергенеза играет значимую роль в углеродном обмене между почвами и атмосферой и оказывает влияние на глобальные климатические процессы [3].

Территория исследований расположена на юго-востоке Западной Сибири, в пределах западного макросклона Томь-Яйского междуречья. Все объекты исследования располагаются в подтаежной природной зоне. Этот регион характеризуется сложным сочетанием геоморфологических, климатических и гидрологических факторов, определяющих специфику почво- и травертинообразования.

Материалом исследования послужили образцы педогенных карбонатов, отобранные из карбонатных горизонтов темно-серых и серых почвенных профилей. Образцы травертинов отобраны на объекте «Таловские чаши», расположенном в 40 км к юго-востоку от г. Томска, в верховьях р. Басандайка.

Особенности состава и строения карбонатных новообразований изучены с помощью аналитического комплекса сканирующего электронного микроскопа (РЭМ) TESCAN Mira III LMU в сочетании с системой анализа элементного состава AZTEC ADVANCED. Диагностика общего минерального состава проводилась с использованием методов рентгенофазового анализа на дифрактометре X'Pert PRO (PANalytical, Нидерланды). Аналитические исследования выполнены с использованием оборудования Томского регионального центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета.

Изучение карбонатных новообразований проведено по 11 почвенным профилям в лесной зоне. Почвы рассматриваемого региона имеют промывной водный режим [6], что не способствует накоплению больших количеств карбонатных новообразований в почвах. Почвенные карбонатные новообразования отмечаются в переходных горизонтах к почвообразующей породе (BC) и в почвообразующей породе (C): минимальное содержание CaCO_3 составляет 1–2 %, среднее содержание 3–4 %, линия вскипания (реакция взаимодействия с 10 %-HCl) находится на глубине 130 см. Максимальное содержание CaCO_3 – 5–6 % (пиковая линия) – обнаруживается на глубине 120–160 см от поверхности почвы в зависимости от рельефа [7]. Установлено, что карбонатные стяжения на глубине 120–160 см формируют естественный геохимический барьер, положение которого детерминировано климатически (K увлажнения = 1.1–1.3), а прогнозируемая дестабилизация этого барьера в условиях потепления определяет его роль как климатического индикатора [6, 13].

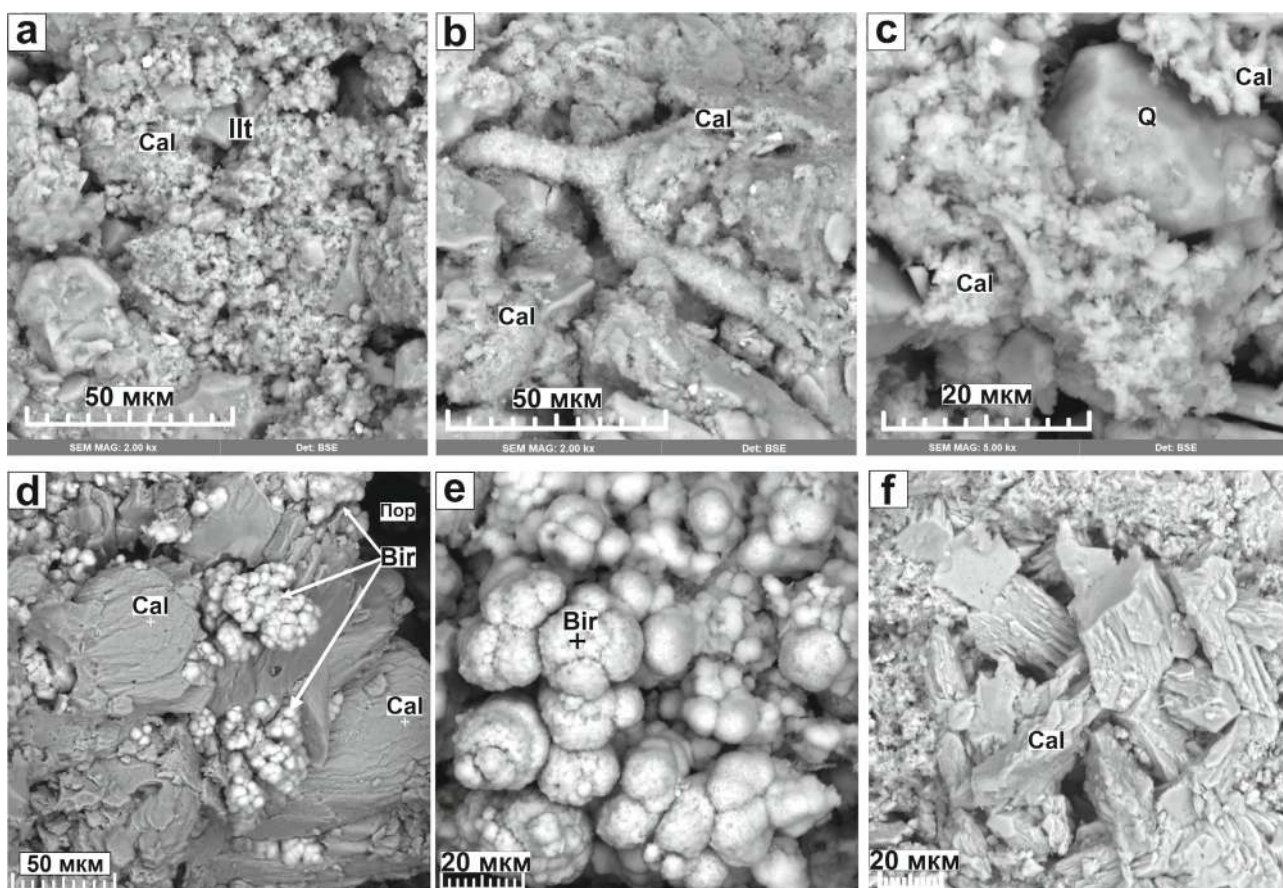
Основной формой карбонатных новообразований являются гипокутаны, представляющие собой рассеянные микроагрегаты, а также морфологически обособленные скопления микрозернистого кальцита, сформировавшиеся в порах и вокруг корневых каналов.

Изучение методами РЭМ показало разнообразные формы карбонатных новообразований – микрокристаллические плотные массы, рыхлые, мучнистые скопления. Комковатые агрегаты (размером <10 мкм) из микрозернистого кальцита формируются в поровом пространстве между такими минеральными компонентами, как иллит и кварц (рисунок, а, с). Встречаются карбонатизированные растительные остатки, фитоморфозы (рисунок, b), что указывает на формирование кальцита из водных растворов, поглощаемых растениями для роста [4]. Кристаллы кальцита размером от 2 до 4 мкм имеют таблитчатую и игольчатую форму (рисунок, с). Игольчатый кальцит является индикатором почвенного увлажнения, достаточного для сапротрофного питания, т.е. его происхождение может быть связано с биологическими процессами [4].

Образцы травертинов отобраны из чаши Удивительной. Дебит источника, вокруг которого сформирована чаша Удивительная, составляет около 1 л/с (июль – август). Родник зимой не замерзает, температура воды колеблется в пределах 4–5 °С. Согласно опубликованным данным воды родников являются пресными (300–1100 мг/дм³), нейтральными или слабощелочными (рН 6.6–8.4) гидрокарбонатными кальциевыми или кальциево-магниевыми. Средняя минерализация подземных вод составляет 580 мг/дм³. Содержание в воде свободного CO_2 достигает 120 мг/дм³, что в шесть раз больше фоновых содержаний [10].

Травертины имеют преимущественно кальцитовый состав, его содержание достигает 90–98 %. В количестве до 7 % отмечается бернессит $((\text{Na},\text{Ca})_{0.5}(\text{Mn}^{4+},\text{Mn}^{3+})_2\text{O}_4 \times 1,5\text{H}_2\text{O})$ [8],

присутствие которого придает травертину более темную окраску (рисунок, b). На основе данных РЭМ установлены особенности микростроения травертинов. В бернессит-кальцитовых участках бернессит образует изолированные глобулярные скопления размером до 300 мкм, обособленные от карбонатного матрикса (рисунок, d). При большем увеличении видно, что данные агрегаты состоят из сфероидальных частиц (диаметр до 30 мкм), сросшихся между собой (рисунок, e). Кальцитовые участки характеризуются послойно ориентированными агрегатами мелко- и микрозернистого (пелитоморфного) кальцита с пористой текстурой (рисунок, f). Агрегаты сложены субпараллельно ориентированными пластинчатыми микрокристаллами кальцита, формирующими плотную структуру с видимыми ступенчатыми гранями роста. Поры двух типов: межагрегатные (округлые и щелевидные) и более мелкие внутриагрегатные полости. Размер пор варьируется от 0.15 до 0.20 мм.



Состав и строение почвенных карбонатных новообразований и травертинов: *a, b* – серая почва, глубина от поверхности 120 см (*горизонт ВСса*); *c* – темно-серая почва, глубина от поверхности 140 см (*горизонт ВСса*); *d, e* – чаша Удивительная (бернессит-кальцитовый участок образца); *f* – чаша Удивительная (кальцитовый участок образца). Режим BSE. Условные обозначения: Cal – кальцит, Illt – иллит, Q – кварц, Bir – бернессит, Пор – поры.

В пределах Колывань-Томской складчатой зоны имеются весьма благоприятные условия для формирования карбонатов при участии подземных вод. Состав гипергенных минералов, их минеральные ассоциации и масштабы гипергенного минералообразования определяются в естественных условиях климатической зональностью, интенсивностью водообмена. В почвах исследуемой территории встречаются карбонатные новообразования хемогенного и биогенного генезиса, представляющие собой агрегаты из таблитчатых и игольчатых микрокристаллов кальцита в смеси с терригенными минералами. Травертины представляют собой агрегаты бернессит-кальцитового и кальцитового состава. Результаты сравнительного анализа позволили установить, что почвенные карбонаты и травертины,

несмотря на различия в морфологии и составе, формируются в едином геохимическом поле при участии подземных вод и отражают положение карбонатного барьера в профиле гипергенеза.

Список литературы

1. Асочакова Е.М., Вологодина И.В., Дутова Е.М. Минеральные ассоциации антропогенного минералообразования в пределах развития железорудной осадочной формации Западной Сибири // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Рациональное природопользование. Современное минералообразование: Труды X Всероссийского симпозиума и XVII Всероссийских чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана, Чита, 12–17 августа 2025 года. Чита: Забайкальский государственный университет, 2025. С. 134–136.
2. Вологодина И.В., Дутова Е.М., Покровский Д.С., Покровский В.Д., Радюк И.В. Природно-техногенные минеральные новообразования на водозаборах Томской области // Вестник СПбГУ. Серия 7. Геология. География. 2015. № 3. С. 58–72.
3. Голубцов В.А., Черкашина А.А., Снытко В.А. Первые данные о возрасте и условиях формирования карбонатных новообразований в позднеплейстоценовых и голоценовых почвах Верхнего Приангарья // Доклады Академии наук. 2019. Т. 486, № 6. С. 727–732.
4. Голубцов В.А., Черкашина А.А., Бронникова М.А. Карбонатные новообразования в степных и лесостепных почвах Байкальского региона: генезис, условия и хронология формирования. Новосибирск: СО РАН, 2021. 221 с.
5. Дутова Е. М. Геохимия подземных вод и процессы вторичного минералообразования на северо-западном Салаире // Известия Томского политехнического университета. 2001. Т. 304, № 1. С. 244–261.
6. Лойко С.В., Герасько Л.И., Кулижский С.П. Природные условия западного макросклона Томь-Яйского междуречья: материалы к полевой части Первой всероссийской школы-конференции по лесной экологии «Современные проблемы и методы лесной экологии» (Томск, 25–30 августа 2013 г.). Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2013. 56 с.
7. Садиров М.Ш., Туробов Э.Ш. Педогенные карбонаты в автоморфных почвах подтаежной зоны юго-восточной части Западной Сибири // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле. 2025. № 2(38). С. 27–39.
8. Садиров М.Ш., Вологодина И.В., Дутова Е.М., Асочакова Е.М., Тишин П.А., Туробов Э.Ш. Геохимические особенности подземных вод и вещественный состав травертинов Таловских чаш (Колывань-Томская складчатая зона, Западная Сибирь) // Геосферные исследования. 2025. № 4. С. 90–105.
9. Соколов Д.А., Андроханов В.А., Кулижский С.П., Доможакова Е.А., Лойко С.В. Морфогенетическая диагностика процессов почвообразования на отвалах каменноугольных разрезов Сибири // Почвоведение. 2015. № 1. С. 106–117.
10. Шварцев С.Л., Лепокурова О.Е., Копылова Ю.Г. Геохимические механизмы образования травертинов из пресных вод на юге Западной Сибири // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 8. С. 852–861.
11. Dutova E.M. Geochemistry of fresh groundwater in the Altai–Sayan folded area and adjacent areas of the West Siberian plate // Applied Geochemistry. 2020. Т. 120. С. 104673.
12. Dutova E., Nalivaiko N., Kuzevanov K., Pokrovsky V., Vologdina I., Pokrovsky D. Hydrogenous mineral neoformations in Tomsk water intake facility from underground sources. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016. С. 012017.
13. Mordvin E.Yu., Pochemin N.M., Volkov N.V., Bondarovich A.A., Lagutin A.A. Changes in Moisture Supply in the Steppe Zone of the Southern Part of Western Siberia for the Period 1980–2050 According to Scenario Forecasts Based on Global CMIP6 Models // Arid Ecosystems. 2024. Vol. 14, iss. 3. P. 259–268.

РАСТВОРЕННОЕ ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО В ХОЛОДНЫХ ИСТОЧНИКАХ БАРГУЗИНСКОЙ ДОЛИНЫ

Украинцев А.В.¹, Потурай В.А.², Чернявский М.К.¹

¹Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, ukraintsev87@bk.ru

²Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан

Аннотация. Изучен состав растворенного органического вещества в водах холодных источников Баргузинской долины. Основными формами миграции органического вещества в водах являются предельные углеводороды различного строения и эфиры. С учетом низкой минерализации вод, возможно, именно растворенные органические вещества и разнообразие бактериальных сообществ определяют бальнеологический эффект рассматриваемых вод.

Ключевые слова: *растворенное органическое вещество, твердофазная экстракция, Баргузинская долина, холодные источники*

Abstract. The composition of dissolved organic matter in the the Barguzin Valley cold springs was studied. The main forms of organic matter in the waters are alcanes of various structures and ethers. Given the low mineralization of the waters, it is possible that dissolved organic matter and the diversity of bacterial communities determine the balneological effect of these waters.

Keywords: *dissolved organic matter, solid-phase extraction, Barguzin valley, cold springs*

Баргузинская долина известна многочисленными проявлениями термальных вод, однако на этой территории также встречаются выходы низкотемпературных источников. По своим химическим свойствам холодные источники Баргузинской долины не могут быть отнесены к минеральным; тем не менее они активно используются местным населением в бальнеологических целях [3]. Нами были изучены несколько проявлений холодных вод, в их числе источники Улюнханский, Букцыхен и Барагхан, расположенные у северо-западного борта Баргузинской впадины (рисунок).



Карта-схема расположения рассматриваемых холодных источников.

Улюнский источник находится в 25 км от с. Баргузин и в 3 км от с. Улюн, вблизи трассы Улан-Удэ – Курумкан. Координаты выхода вод 53°47'051.2" с.ш. и 109°52'09.7" в.д. Дебит источника, по оценкам исследователей, составляет около 7 л/с [3]. Воды разгружаются в нескольких точках и формируют ручей, который впадает в р. Баргузин. Температура воды на

выходе 6.1 °С, рН 8.2. Общая минерализация воды составляет 265 мг/дм³. По химическому составу вода источника сульфатно-гидрокарбонатная натриево-кальциевая, пресная.

Источник Буксыхен расположен в 50 км от с. Баргузин, в 5 км от с. Элэсун, в 1 км от трассы Улан-Удэ – Курумкан. Источник представлен шестью выходами, которые берут начало из-под крутого скального выступа и сливаются в единый ручей. Местные жители используют источники в бальнеологических целях. Каждый из шести выходов обозначен в соответствии с предполагаемыми лечебными свойствами: «полезен для сердечно-сосудистой системы», «полезен для ЖКТ», «полезен для почек и мужского здоровья», «полезен для печени, женского здоровья и дыхательной системы», «полезен для щитовидной железы, обмена веществ, помогает от аллергии», «полезен для зрения». Координаты: 53°59'47.3" с.ш и 110°01'42.7" в.д. Дебит источника по литературным данным составляет около 3-4 л/с [2, 3]. Температура воды в среднем составила 4.42 °С, рН 8.38. Общая минерализация воды 83.02 мг/дм³. По химическому составу вода источника гидрокарбонатная натриево-кальциевая, ультрапресная.

Выход источника Барагхан расположен в 65 км от с. Баргузин, в 8 км от с. Барагхан, в 2 км от трассы Улан-Удэ – Курумкан. Вода разгружается в лощине, густо заросшей кустарниками, в естественную воронку размерами 1.2×1.5 м и формирует ручей, в 500 м ниже по течению которого располагается небольшой дом отдыха. Считается, что вода источника Барагхан полезна для лечения почек, бронхолегочных заболеваний, желудочно-кишечного тракта. Координаты места выхода источника 54°05'59.5" с.ш. и 110°05'50.34" в.д. Температура воды 4° С, рН 8.1, общая минерализация 71.8 мг/дм³. По химическому составу вода сульфатно-гидрокарбонатная кальциевая, ультрапресная.

Источники Баргузинской долины обследовались нами в 2024 г. в рамках работ по созданию концептуальной модели формирования вещественного состава термальных вод Забайкалья [7]. Основные физико-химические характеристики определялись непосредственно на водопрооявлениях. Температура воды измерялась цифровым термометром «CENTER375», показатель рН – с помощью портативного рН-метра МАРК-603 с комбинированным электродом ЭСК-10601/7. Пробы воды для анализа состава растворенных органических веществ отбирались в бутылки из темного стекла объемом 1 л с вкладышем из фольги под крышкой. Пробоподготовка проводилась в максимально короткие сроки после отбора проб с целью зафиксировать исходный состав органического вещества в воде на выходе источника. Для пробоподготовки воды в полевых условиях применялась специальная портативная установка для твердофазной экстракции. В результате экстракции растворенные в анализируемой воде органические вещества переносятся на сорбент и способны храниться до анализа в лаборатории длительное время (около 100 сут) без изменения их состава. Использовались картриджи с сорбентом DSC-18 (масса сорбента 50 мг) компании Supelco (Sigma Aldrich), скорость потока воды через сорбент поддерживалась около 1 мл/мин [4]. Органические вещества смывались с сорбента 500 мкл дихлорметана непосредственно перед проведением качественного анализа в лаборатории. Для качественного анализа органических соединений использовали метод капиллярной газовой хромато-масс-спектрометрии. Анализ проводили в лаборатории ИКАРП ДВО РАН на газовом хромато-масс-спектрометре Shimadzu GCMS-QP2010 Ultra, оборудованном автосэмплером АОС-5000 (аналитик – В.А. Потурай).

В водах рассматриваемых источников обнаружены растворенные органические вещества, относящиеся к 15 гомологическим рядам (таблица). Среди них преобладают алифатические соединения, наиболее широко представлены предельные углеводороды простого и разветвленного строения и эфиры. Всего было определено различных соединений для Улюнского источника – 71, для источника Буксыхен – 83, для источника Барагхан – 93.

Распределение растворенных органических веществ в водах рассматриваемых холодных источников Баргузинской долины носит схожий характер. Большинство соединений, вероятно, имеют природное происхождение. В качестве антропогенных загрязнителей можно отметить фталаты, их нахождение в водах связывают с инструментальным загрязнением.

Растворенные органические вещества в исследуемых водах

№	Гомологический ряд	Содержание в %		
		Улюнский	Буксыхен	Барагхан
1	Алканы	9.6 (15)	9.2 (14)	8.4 (16)
2	Изоалканы	32.3 (20)	29,0 (22)	26.1 (20)
3	Диметоксиалканы	-	-	0.5 (1)
4	Алкены	4.8 (6)	5.3 (6)	4.9 (7)
5	Арены	1.6 (2)	3.8 (3)	1.8 (3)
6	ПАУ	5.0 (3)	5.7 (5)	5.0 (6)
7	Гетероароматика	10,0 (4)	8.4 (4)	9.1 (6)
8	Карбоновые кислоты	-	0.7 (1)	1.1 (2)
9	Эфиры	24.0 (13)	26.2 (16)	30.3 (18)
10	Альдегиды	3,3 (2)	3.2 (3)	2.9 (3)
11	Кетоны	0,6 (1)	2.4 (1)	2.5 (2)
12	Спирты	6.2 (2)	2.4 (1)	3.7 (2)
13	Азотсодержащие	-	0,4 (1)	0.3 (1)
14	Терпены	0.8 (1)	0.8 (2)	0,6 (2)
15	Фталаты	1.8 (2)	2.5 (4)	2.8 (4)
Итого		100 (71)	100 (83)	100 (93)

Примечание. В скобках указано количество соединений для каждого гомологического ряда; прочерк – соединения не обнаружены.

Геологической особенностью пород, слагающих район выхода источников, является наличие кембрийских отложений, сформировавшихся в морских условиях [6]. С этим связано повышенное содержание сульфат-ионов в водах. Вероятно, полученный состав органических веществ также определяется распространением в рассматриваемом районе осадочных пород морского происхождения. Ранее исследователями были получены подобные соотношения для холодных подземных вод районов азотных терм Приамурья. По составу растворенных органических соединений рассматриваемые источники имеют наибольшее сходство с холодными подземными водами района Анненских терм [5]. Высокий процент низкомолекулярного гомолога C11 среди предельных углеводородов, учитывая низкую температуру вод, можно связать с бактериальной деятельностью. Таксономическое разнообразие бактериальных сообществ в водах источника Буксыхен находится в тесной связи с содержанием органического углерода [1].

Холодные воды источников Баргузинской долины характеризуются очень низкой минерализацией. Возможно, их бальнеологическая ценность определяется не ионным составом вод, а особенностями растворенных органических веществ и разнообразием бактериальных сообществ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-77-10035, <https://rscf.ru/en/project/24-77-10035/>).

Список литературы

1. Банзаракцаева Т.Г., Дамбинова Е.Ц., Иванов В.Л. Экологические условия и таксономическое разнообразие микробного сообщества воды холодного источника Буксыхен (Северное Прибайкалье) // Природа Внутренней Азии. 2023. № 1(23). С. 6–17.
2. Дамбинова Е.Ц., Банзаракцаева Т.Г., Бархутова Д.Д., Хахинов В.В. Физико-химическая характеристика холодного источника Буксыхен (Северное Прибайкалье) // Вестник Бурятского государственного университета. 2014. № 3. С. 76–78.
3. Намсараев Б.Б. и др. Водные системы Баргузинской котловины. Улан-Удэ: Изд-во Бурят. гос. ун-та, 2007. 152 с.

4. Потурай В.А. Использование картриджей для твердофазной экстракции при анализе органических соединений в природных водах // Региональные проблемы. 2025. Т. 28, № 3. С. 19–33.
5. Потурай В.А. Органическое вещество в холодных подземных водах районов азотных терм Приамурья // Региональные проблемы. 2016. Т. 19, № 4. С. 59–66.
6. Украинцев А.В., Плюснин А.М. Растворенные органические вещества в азотных термах Прибайкалья // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием имени профессора С.Л. Шварцева. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. С. 45–49.
7. Zippa E.V., Ukraintsev A.V., Chernyavskii M.K., Fedorov I.A., Poturay V.A., Domrocheva E.V., & Mukhortina N.A. Thermal waters in the central part of Baikal Rift Zone: Hydrogeochemistry and geothermometry (Republic of Buryatia, Russia) // Geothermics. 2025. 130. 103317.

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ КИСЛОРОДА ($\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$) И ВОДОРОДА (δD) ВОДНОЙ КОМПОНЕНТЫ ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ ЗАПАДНО-КУБАНСКОГО ПРОГИБА: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Харитонов Н.А.^{1,3}, Казак Е.С.¹, Челноков Г.А.², Карабцов А.А.³, Асеева А.В.³,
Лаврушин В.Ю.²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический ф-т,
Москва, tchenat@mail.ru

²Геологический институт РАН, Москва

³Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток

Аннотация. В статье представлены данные о содержании стабильных изотопов ($\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$ и δD) в различных типах вод, экстрагированных из глинистой пульпы вулканов южной части Западно-Кубанского прогиба. Температура извлечения составляла 105 и 350 °С. Результаты исследования показывают, что водная компонента данных вулканов формируется за счет трех источников: метеорных вод региона, местных морских вод, а также межслоевых и слабосвязанных вод глинистых фракций, извлекаемых при их прогреве.

Ключевые слова: грязевые вулканы, водная фаза, стабильные изотопы, экспериментальные исследования

Abstract. The article presents data on the content of stable isotopes ($\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$ and δD) in various types of waters extracted from the clay pulp of volcanoes in the southern part of the West Kuban Trough. The extraction temperatures were 105 and 350 °C. The results of the study show that the water component of these volcanoes is formed due to three sources: meteoric waters of the region, local sea waters, as well as interlayer and loosely bound waters of clay fractions extracted during their heating.

Keywords: mud volcanoes, aqueous phase, stable isotopes, experimental studies

Геохимическое исследование основных компонентов извержений грязевых вулканов (вода, порода и газ) позволяет понять их генезис, установить связь с углеводородами и реконструировать историю развития рассматриваемого осадочного бассейна. Водная фаза – основной компонент грязевулканического субстрата, однако ее генезис все еще неясен, несмотря на значительные усилия ученых. Непонятен механизм формирования разжиженной глинистой пульпы и уровень гидродинамической изолированности грязевулканических каналов от расположенных рядом водоносных комплексов и морских вод.

Крупнейший район проявления грязевого вулканизма на территории РФ – южная часть Западно-Кубанского прогиба, включая полуострова Таманский и Керченский. В пределах Керченско-Таманской области сосредоточено более 80 грязевых вулканов, из которых примерно половина действует постоянно [1]. Основная цель работы – комплексное изучение изотопных характеристик ($\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) различных генетических типов вод (свободных, физически и химически связанных), содержащихся в глинистой пульпе грязевых вулканов.

Было исследовано 22 грязевых вулкана Керченско-Таманского региона: 13 на Керчинском и 9 на Таманском полуострове [4]. На вулканах отбирались образцы глинистой пульпы, которая после отстаивания в течение суток отфильтровывалась через мембранный фильтр Advantec с размером пор 0.45 мкм. Образцы после отбора были герметично упакованы в несколько полиэтиленовых пакетов и хранились в лабораторных условиях без перепада температуры для предотвращения их испарения. Минеральная фаза была изучена методами рентгенофазового анализа и ИСП-МС. Пробы свободной (пластовой) воды для изотопных исследований были отобраны в пластиковые емкости по 10 мл без фильтрации. Выделение поровой и физически связанной водных фаз выполнялось методом испарения на устройстве для анализа водосодержания УДАВ 1.2–5.0. Относительная ошибка определения не превышает 5 отн. % [7].

Выделение воды из образцов пород проводилось при температуре 105 и 350 °С в течение пяти часов. Для выявления влияния процессов испарения и влажности на изотопный состав изучаемых вод был произведен расчет эксцессов: дейтериевого D-ехс (‰) и $\Delta^{17}\text{O}_{\text{ехс}}$ (мг/дм³).

Практически все изученные грязевулканические воды являются холодными ($t < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) с рН 7.0–8.9 и Eh от –220 до +430 мВ. Минерализация водной компоненты сильно варьируется по вулканам и располагается в диапазоне значений 5.0–25.0 г/дм³. По химическому составу большинство исследуемых вод относятся к $\text{HCO}_3\text{-Cl/Na}$ и Cl/Na типу, $r_{\text{Na}}/r_{\text{Cl}}$ варьируется и зависит от химического состава воды, составляя 0.7–1.44 и 1.94–4.12 для вод Cl/Na и $\text{HCO}_3\text{-Cl/Na}$ типа соответственно. В сравнении с морской водой изучаемые грязевулканические воды обогащены В, Br, Ba, I, Li, Hg и As [2].

Глинистая пульпа вулканов однотипная и представляет собой умеренно песчанистые гидрослюдистые осадки майкопской серии с различным соотношением минеральных глинистых фаз. В осадках преобладает смектит (~30–40 мас. %), затем каолинит (~10–20 мас. %), хлорит (~1–7 мас. %), кварц (~20–45 мас. %) и плагиоклаз (~5–10 мас. %).

Свободные воды, полученные после отстаивания, демонстрируют «тяжелый» изотопный состав: $\delta^{17}\text{O}$ варьируется от –0.52 до +5.88 ‰, $\delta^{18}\text{O}$ – от –0.97 до +13.19 ‰, а δD от –31.3 до –5.8 ‰. Наиболее «изотопно-тяжелыми» по $\delta^{18}\text{O}$ ($> +13\text{ }‰$) являются воды вулканов Борух-Оба, Трубецкого, Булганакский очаг и Андрусова, а по $\delta^{17}\text{O}$ ($> +7\text{ }‰$) – Ахтанизовский, Еникальский, Булганакский очаг, Борух-Оба и Трубецкого. Аномально высокое значение дейтерия ($> -15.0\text{ }‰$) зафиксировано в водах вулканов Бурашский, Андрусова, Гладковский и Борух-Оба. Наиболее «изотопно-легкими» являются воды вулканов Сююрташский и Насырский. Наиболее низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ характерны для вулканов, имеющих связь с подземными водами морского генезиса, а наиболее высокие – для вулканов, подвергшихся процессу значительного испарительного концентрирования.

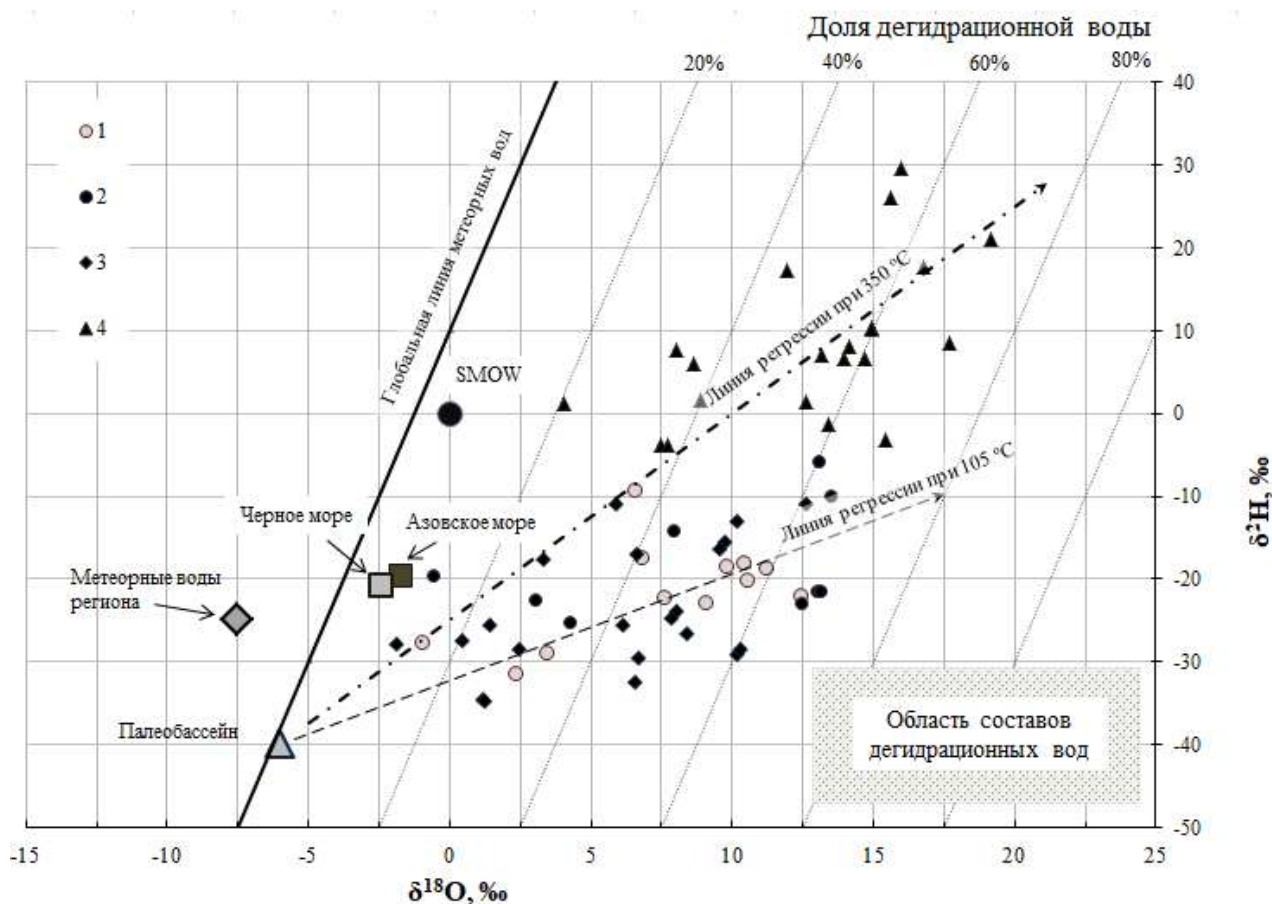
В сравнении с локальными атмосферными и морскими водами, в водах вулканов наблюдается ярко выраженное обогащение $\delta^{18}\text{O}$ (до +17.1 ‰) и незначительный дефицит δD (до –20 ‰), что вызывает заметное отклонение от глобальной линии метеорных вод. На бинарной диаграмме $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ воды вулканов отчетливо демонстрируют сдвиг вправо от ГЛМВ (рисунок). Многие вулканы (Борух-Оба, Андрусова, Ахтанизовский, Еникальский, Булганакский очаг и Трубецкого) проявляют значительный сдвиг вправо с $\Delta^{18}\text{O} > +15\text{ }‰$. Этот сдвиг может быть обусловлен изотопным обменом между водой и кислородсодержащими фазами грязевулканического субстрата. Наибольший сдвиг по кислороду фиксируется в вулканах с температурой прогрева более 90 °С.

В интервале температур 90–105 °С из образцов грязевой пульпы выделяется межслоевая и поверхностно-адсорбированная вода. Масса выделившейся воды сильно варьируется в диапазоне 1.37–14.70 г и зависит от минерального состава образца и его исходной влажности. Изотопный состав этой воды неоднороден, изменяется от –34.8 до –10.9 ‰ для δD и от –1.87 до +12.62 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$. На бинарной диаграмме $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ тренд изменения изотопного состава адсорбированной воды практически идентичен тренду для жидких вод грязевых вулканов (рисунок). Это свидетельствует о значительном в процентном соотношении вкладе рыхлосвязанных вод в общий баланс гравитационных вод грязевых вулканов и о значительном прогреве исходных вод – до 120–140 °С – при их погружении. Расчет температуры прогрева грязевулканических вод, выполненный на основе Mg–Li геотермометра, демонстрирует значения 47–138 °С.

По изменению δD в эксперименте все пробы разделяются на две неравнозначные группы: в первой выявлено увеличение значения δD при нагревании, а во второй наблюдается заметный дефицит δD (до $>10\text{ }‰$) выделившейся воды при прогреве до 105 °С. Уровень облегчения δD образца зависит от объема адсорбционной воды в глинистых фазах или наличия гипса.

Воды, выделенные при температуре 105 °С, по своему изотопному составу близки к водам, полученным без нагрева, просто при отстаивании грязевулканической субстанции. Однако воды, извлеченные при 350 °С, проявляют отчетливое утяжеление по дейтерию. Линия тренда $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$ (рисунок) указывает на осуществление процесса испарительного концентрирования в результате повышения температуры. Если бы при наблюдаемой экстракции происходила трансформация смектита, в котором может содержаться до

25 мас. % кристаллизационных вод, в иллит и другие гидрослюды, то мы бы наблюдали облегчение выделяемых вод по дейтерию. По данным ряда исследователей гидратационные воды характеризуются облегченным составом по дейтерию [3, 6, 8]. Однако в нашем случае мы фиксируем утяжеление воды δD , что может быть следствием испарительного фракционирования. Результаты рентгенофазовых исследований глинистой пульпы вулканов после прокаливании образца до 350 °C выявляют отсутствие структурной перестройки смектита.



Изотопный состав изученных вод в координатах $\delta^{18}O$ и δD . Область составов дегидрационных вод и данные по изотопному составу метеорных вод региона заимствованы из работы [5]. 1 – пробы грязевых вод вулканов Таманского полуострова; 2 – пробы грязевых вод вулканов Керченского полуострова; 3 – воды, полученные при экстракции 105 °C; 4 – воды, полученные при экстракции 350 °C.

Между концентрациями молекул $H_2^{18}O$ и $H_2^{17}O$ в грязевулканических водах наблюдается тесная корреляционная связь и линия регрессии, аппроксимирующая значения функции $\delta^{17}O(\delta^{18}O)$ в жидких водах вулканов, имеет наклон 0.527, близкий к наклону природных вод (0.528). Линия регрессии в рыхлосвязанной воде изменяет свой наклон до 0.521. В то же время наблюдается практически прямая корреляция между параметрами $\Delta^{17}O_{exs}$ и D-*exs*. Вода, извлеченная при 350 °C, по показателю $\Delta^{17}O_{exs}$ сильно дисперсионная: в некоторых вулканах наблюдаются резко отрицательные значения, в других же зафиксированы положительные значения. Линия регрессии $\delta^{17}O(\delta^{18}O)$ увеличивает свой наклон до 0.525, также обнаруживается положительная корреляция между параметрами $\Delta^{17}O_{exs}$ и D-*exs*. В целом, изотопный состав воды по кислороду демонстрирует различные условия ее формирования, такие как температура и влажность.

Данные изотопного состава жидких и экстрагированных вод свидетельствуют об их различном генезисе, что позволяет предполагать три источника воды в грязевулканических

выбросах: локальные морские воды современного/палео возраста, местные атмосферные осадки и адсорбционный комплекс глин. Наши данные показывают, что при погружении на глубину 1–3 км исходно морских вод происходит их изотопное фракционирование в процессе подземного испарения. В результате данного процесса в грязевулканическом очаге накапливаются воды с избытком кислорода и дейтерия. На данном этапе исследования значимый вклад структурных вод, высвобождающихся при иллитизации смектита, не просматривается. Возможно, неочевидность вклада ОН-групп в изотопный состав изучаемых грязевулканических вод обусловлена смешанной изотопной характеристикой выделяемых нами вод.

Список литературы

1. Алиев Ад.А., Гулиев И.С., Дадашев Ф.Г., Рахманов Р.Р. Атлас грязевых вулканов мира. Баку: Изд-во «Nafta-Press», 2015. 322 с..
2. Лаврушин В.Ю., Копф А., Дейхле А., Степанец М.И. Изотопы бора и формирование грязевулканических флюидов Тамани (Россия) и Кахетии (Грузия) // Литология и полезные ископаемые. 2003. № 2. С. 147–182.
3. Селецкий Ю.Б. Дегидратация глин как возможный фактор формирования изотопного состава глубоких подземных вод // Водные ресурсы. 1978. № 3. С. 148–152.
4. Харитонов Н.А., Челноков Г.А., Казак Е.С., Асеева А.В., Ермаков А.В., Карабцов А.А., Лаврушин В.Ю. Изотопные характеристики ($\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$, δD) свободной и связанной вод глинистой фракции грязевых вулканов южной части Западно-Кубанского прогиба // Вестник Моск. ун-та. Сер.4. Геология. 2026. № 1.
5. Chelnokov G.A., Bragin I.V., Kharitonova N.A. Geochemistry of mineral waters and associated gases of the Sakhalin Island (Far East of Russia) // Journal of Hydrology. 2018. Vol. 559. P. 942–953. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.049>.
6. Kanik N.J., Longstaffe F.J., Kuligiewicz A., Derkowski A. Systematics of smectite hydrogen-isotope composition: Structural hydrogen versus adsorbed water // Applied Clay Science. 2022. 216. 106338 <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106338>.
7. Kazak E.S., Kazak A.V. A novel laboratory method for reliable water content determination of shale reservoir rocks // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. Vol. 106301.
8. Whittaker M.L., Shoaib M., Lammers L.N. et al. Smectite phase separation is driven by hydration-mediated interfacial charge // Journal of Colloid Interface Sci. 2023. Vol. 647. P. 406–420. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.05.085>.

РАДИАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ И ЮЖНОЙ ЧАСТИ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ

Яковлев Е.Ю., Дружинин С.В., Зыков С.Б.

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН, Архангельск, druzhininserg@yandex.ru

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследований, выполненные в 2022 г. на территории Ленинградской области и южной части Республики Карелия. Получены значения концентраций и удельных активностей изотопов урана (^{234}U и ^{238}U), объемная активность ^{222}Rn и определен химический макрокомпонентный состав воды. Рассмотрены возможные предпосылки появления высоких избытков ^{234}U в подземных водах. Выполнена сравнительная оценка концентрации изотопов урана с физико-химическими показателями.

Ключевые слова: изотопы урана, радон, подземные воды, Ленинградская область, Республика Карелия

Abstract. This article presents the results of studies of the concentrations and specific activities of uranium isotopes (^{234}U and ^{238}U), the volumetric activity of ^{222}Rn , and the chemical macrocomponent composition of water. These studies were conducted in 2022 in the Leningrad Region and the southern part of the Republic of Karelia. Possible prerequisites for the occurrence of extremely high excesses of ^{234}U in groundwater are considered. Data are presented comparing the concentration of uranium isotopes with the physical and chemical parameters of groundwater.

Keywords: uranium isotopes, radon, groundwater, Leningrad Oblast, Republic of Karelia

Для подземных вод некоторых регионов мира изотопы урана являются основным естественным источником ухудшения радиологических характеристик водоносных горизонтов. В основном радиоактивность урана может быть полностью определена по содержаниям в подземной воде изотопа ^{238}U . Однако в аспекте радиологической токсичности подземных вод важную роль играет изотоп ^{234}U , что обусловлено различной геохимической мобильностью изотопов ^{234}U и ^{238}U , когда при взаимодействии водовмещающих пород с подземными водами происходит преимущественное выщелачивание более геохимически подвижного ^{234}U . В результате этого в подземных водах формируется избыток ^{234}U , как правило, в диапазоне $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \approx 1.2\text{--}2.5$, который обычно связывают с различием в литологических типах водоносных горизонтов. В некоторых исследованиях наблюдаются ураганные избытки ^{234}U в подземных водах, при этом отношения изотопов могут достигать $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \approx 50$, что существенно ухудшает радиационное качество подземных вод [2]. Ранее авторами выявлены подземные воды с высокими избытками ^{234}U ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \approx 16$) в пермских отложениях Предволжья [3].

В литературе имеются данные о значительных избытках урана-234 в вендском водоносном комплексе в зоне сочленения Восточно-Европейской платформы и Балтийского кристаллического массива. В связи с этим целью настоящего исследования являлось изучение предпосылок появления ураганных избытков ^{234}U в подземных водах на территории Ленинградской области и южной части Республики Карелия.

Схема расположения районов исследования, локализация точек опробования и распределение гидрохимических типов подземных вод представлены на рисунке. На территории Ленинградской области было отобрано 36 проб подземных вод в основном из скважин питьевого водоснабжения. На территории южной части Республики Карелия отобрано 12 проб подземных вод, представленных скважинами питьевого и бальнеологического назначения.

Для определения растворенного урана отбирались пробы воды объемом 5 л, консервировались HNO_3 . Выделение изотопов урана из подземных вод осуществлялось методом осаждения на гидроксидах железа по методике ВИМС [1]. Спектрометрическое детектирование выполнялось на полупроводниковом альфа-спектрометре «Мультирад-АС».

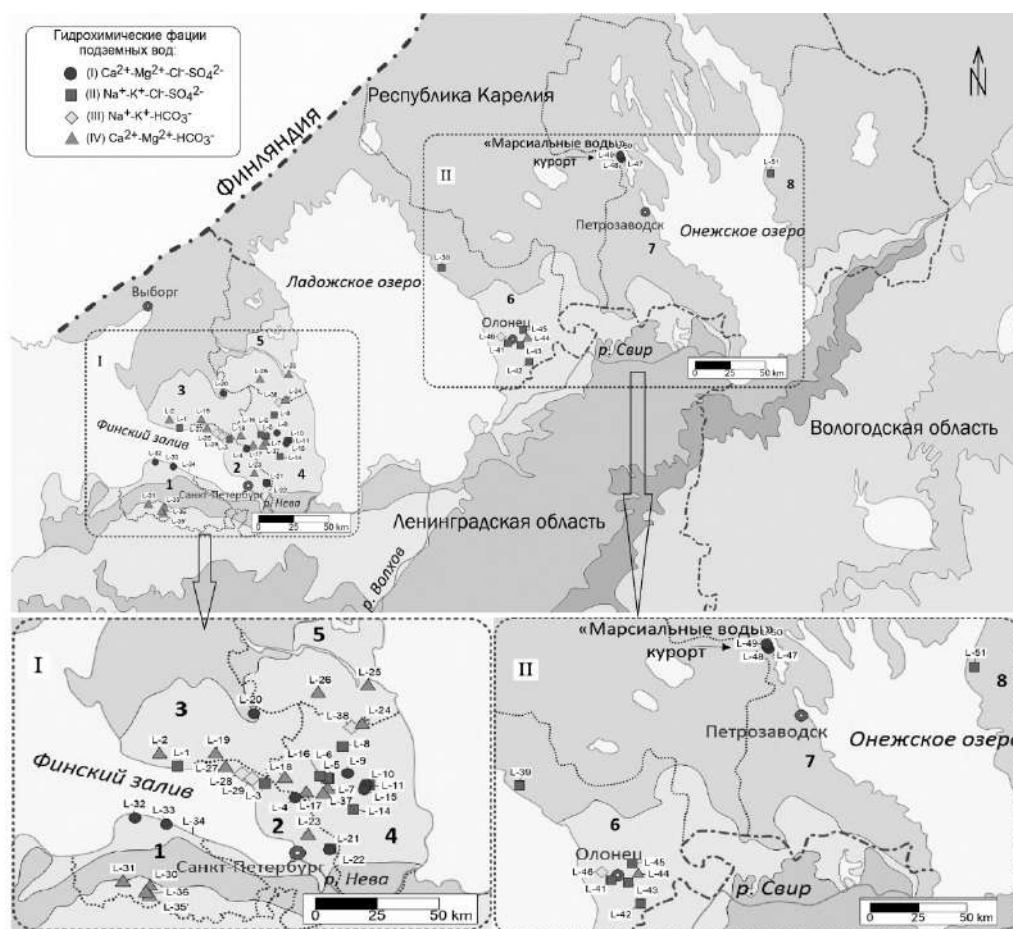


Схема расположения точек опробования и распределения гидрохимических типов подземных вод: I – Ленинградская область, II – южная часть Республики Карелия; 1 – Ломоносовский район (7 проб), 2 – Санкт-Петербург (8 проб), 3 – Выборгский район (4 пробы), 4 – Всеволожский район (15 проб), 5 – Приозерский район (2 пробы), 6 – Восточное Приладожье (7 проб), 7 – Западное Прионежье (4 пробы); 8 – Восточное Прионежье (1 проба).

Измерения объемной активности ^{222}Rn в воде выполнялись с помощью радиометра радона «Альфарад плюс-АР» на месте отбора проб.

Физико-химические параметры вод, такие как pH, Eh, электропроводность, температура, содержание растворенного O_2 , определялись непосредственно во время отбора проб. Измерение pH, Eh проводили с помощью портативного комбинированного прибора HANNA HI9126, растворенного кислорода, с помощью оксиметра HI9142, а электропроводности и температуры воды – с помощью кондуктометра МАРК-603/1.

Отбор проб воды для определения макрокомпонентного состава выполнялся в стерильные пробирки из полимерного материала с фильтрацией через мембранный фильтр с размером пор 0.45 мкм и подкислением HNO_3 до $\text{pH} < 2$. Определение химического состава выполнялось методом ионной хроматографии.

В целом, для подземных вод Ленинградской области характерна крайне низкая концентрация урана, составляющая в среднем 0.3 мкг/дм^3 ($0.10\text{--}1.42 \text{ мкг/дм}^3$), что значительно ниже предельной величины, установленной СанПиН 1.2.3685-21 (15 мкг/дм^3) и рекомендованной ВОЗ (30 мкг/дм^3). Альфа-активность изотопов урана ^{238}U и ^{234}U в подземных водах Ленинградской области находится в диапазонах $0.0001\text{--}0.0176 \text{ Бк/дм}^3$ и $0.0002\text{--}0.0909 \text{ Бк/дм}^3$ соответственно, в то время как уровень вмешательства согласно НРБ-2009/99 для ^{234}U составляет 2.8 Бк/дм^3 , а ^{238}U – 3.0 Бк/дм^3 . Суммарная средняя альфа-активность изотопов урана не превышает 0.015 Бк/дм^3 , а максимальная – 0.094 Бк/дм^3 , не достигая предельных значений

уровней вмешательства, установленных НРБ-2009/99 (0.2 Бк/дм³). Отношение изотопов урана ²³⁴U/²³⁸U варьируется от 1.14 до 25.4 с максимальным значением во Всеволожском районе.

Подземные воды южной части Республики Карелия имеют концентрацию урана от 0.02 до 195.90 мкг/дм³ с наибольшим значением в Восточном Прионежье. Активность изотопов ²³⁸U и ²³⁴U составляет 0.002–2.420 Бк/дм³ и 0.0002–7.86 Бк/дм³ соответственно. Суммарная альфа-активность для одной из проб достигает 10.3 Бк/дм³, что выше уровня вмешательства. Отношение изотопов ²³⁴U/²³⁸U находится в пределах 1.09–9.15.

По соотношению основных катионов и анионов пробы группируются в четыре гидрохимические фации (результатирующее поле диаграммы Пайпера):

(I) Ca²⁺-Mg²⁺-SO₄²⁻-Cl⁻: 12 проб (25 %) относится к геохимической фации сульфатных кальциевых пресных вод с минерализацией до 0.5 г/дм³;

(II) Na⁺-K⁺-Cl⁻-SO₄²⁻: 15 проб (32 %) обособляется в зоне геохимической фации хлоридных натриевых соленых вод с минерализацией до 7.1 г/дм³, вскрываемых скважинами на глубине свыше 100–150 м;

(III) Na⁺-K⁺-HCO₃⁻: 4 пробы (8 %) представляют геохимическую фацию пресных вод, измененные под влиянием ионного обмена Ca²⁺ на Na⁺ с минерализацией до 0.3 г/дм³;

(IV) Ca²⁺-Mg²⁺-HCO₃⁻: 16 проб (34 %) спроецировалась в зону геохимической фации гидрокарбонатных кальциевых вод с минерализацией не более 0.3 г/дм³.

Строгой приуроченности геохимических фаций к конкретным гидрогеологическим подразделениям не обнаруживается. Последнее является следствием разнообразия в условиях современного питания подземных вод и характером водообмена в прошлом.

Данные по основным физико-химическим и радиационным параметрам для выделенных гидрохимических фаций подземных вод представлены в таблице.

Физико-химические и радиационные характеристики различных гидрохимических фаций исследуемых подземных вод

Фация	Значение	pH	Eh, mV	T, °C	TDS, мг/дм ³	Rn, Бк/дм ³	²³⁴ U/ ²³⁸ U	²³⁸ U, Бк/дм ³	²³⁴ U, Бк/дм ³	Общая альфа-активность, Бк/дм ³	U, мкг/дм ³
I	мин.	5.43	-42	5.8	25.8	11	1.24	0.0015	0.0027	0.005	0.12
	сред.	6.38	106	10.2	228.6	77	2.88	0.0041	0.0138	0.018	0.33
	макс.	7.55	221	21.8	532.9	240	9.15	0.0072	0.0518	0.057	0.58
II	мин.	6.00	-260	7.2	63.6	5	1.26	0.0002	0.0008	0.001	0.02
	сред.	7.62	-44	10.1	2102	48	7.34	0.0023	0.0157	0.019	0.19
	макс.	8.36	180	12.8	7174	357	25.4	0.0084	0.0909	0.094	0.68
III	мин.	7.65	-96	7.9	135.2	18	1.09	0.0002	0.0002	0.0001	0.02
	сред.	7.97	-66	8.9	191.3	41	4.48	0.0008	0.0049	0.006	0.06
	макс.	8.23	-3	10.6	321.5	105	12.3	0.0015	0.0189	0.020	0.12
IV	мин.	6.09	-90	7.4	57.0	4	1.14	0.0001	0.0002	0.000	0.01
	сред.	7.19	66	9.4	155.6	28	1.84	0.0043	0.0064	0.011	0.35
	макс.	7.96	352	12.9	321.0	142	3.40	0.0176	0.0268	0.044	1.42

Прямая зависимость суммарной альфа-активности от концентрации урана определенно наблюдается только для фации IV. Для фации I эта зависимость имеет место только при концентрациях урана менее 0.6 мкг/дм³ и до общей альфа-активности 0.02 Бк/дм³, затем увеличение суммарной активности не сопровождается увеличением концентрации урана. Для гидрохимических типов II и III отсутствует явный тренд увеличения суммарной альфа-активности при увеличении концентрации U. Напротив, при увеличении избытка изотопа ²³⁴U общая альфа-активность растет для всех типов воды, за исключением фации IV. Положительная зависимость между изотопным отношением ²³⁴U/²³⁸U и общей альфа-активностью характерна также для фации I. В наибольшей степени это проявляется в водах фации II.

Кислотность исследуемых вод по фациям отличается незначительно (таблица). Значения Eh свидетельствуют о преобладании умеренно-восстановительных – слабо-окислительных условий (таблица). Данные физико-химические условия свидетельствуют о том, что уран в рассматриваемых подземных водах, вероятнее всего, находится преимущественно в виде уранилкарбонатных комплексов. Для гидрохимических фаций I и VI характерен уран в основном в форме $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$, а для фации II и III существует вероятность присутствия урана в формах $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ и $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$. Рост Eh способствует увеличению содержаний урана в воде и росту общей альфа-активности, что наиболее очевидно для вод фации IV.

Возрастание минерализации воды сопровождается ростом суммарной альфа-активности и концентраций урана для фации IV и I. Данный эффект обусловлен процессом постепенного выщелачивания урана в виде уранилкарбонатных комплексов из вмещающих пород в ходе фильтрации от современной области питания.

Характерной особенностью региона является переход к преобладанию хлоридного натриевого облика подземных вод при увеличении минерализации свыше 0.6 г/дм^3 . Эти же воды отличаются наибольшей избыточной активностью урана-234. Воды данного гидрохимического типа четко разделяются на две подгруппы. Первый компонент имеет высокие отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \sim 25$ и относительно низкую ($<2 \text{ г/дм}^3$) минерализацию. Второй компонент характеризуется относительно низкими отношениями $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \sim 7$ и заметно большей (до 7 г/дм^3) минерализацией.

Существенное отклонение от равновесных значений $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1$, обнаруженное в ряде проб подземных вод, отражает географо-климатические события, имевшие место в прошлом на данной территории, и свидетельствует о существовании мерзлоты на данной территории в прошлом. Первая подгруппа соленых вод (низкая минерализация – высокие отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) является растаявшими подземными льдами. Вторая подгруппа (повышенная минерализация – относительно невысокие отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) – это остаточные воды, оттесненные вниз по разрезу при его замораживании.

Максимальное измеренное отношение составляет $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 25.4$. Данная проба при низкой активности изотопа $^{238}\text{U} = 0.0036 \text{ Бк/дм}^3$ из-за аномально высоких избытков ^{234}U имеет суммарную альфа-активность около 0.09 Бк/дм^3 . Расчет показывает, что при отношении $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} > 28$ подобные воды превысят пороговый уровень вмешательства для суммарной альфа-активности.

Таким образом, разрешается противоречие между нормированием содержаний урана по предельно допустимым концентрациям и ограничением в виде степени вмешательства. В качестве скринингового параметра предлагается использовать концентрацию урана в воде на уровне 0.5 мкг/дм^3 , а при превышении этой концентрации – переходить к определению активности его изотопов. Также особую роль в формировании величин суммарной альфа-активности подземных вод играет ^{226}Ra , анализ которого планируется выполнить в будущем.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН №FUUW-2025-0011, № гос. регистрации 125022002727-2.

Список литературы

1. Методика измерения объемной активности изотопов урана (^{238}U , ^{234}U , ^{235}U) в пробах природных (пресных и минерализованных), технологических и сточных вод альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой. М.: ВИМС, 2013. 15 с.
2. Поляков В.А. Изучение изменений гидрохимии и ресурсов подземных вод прибрежных водозаборов в Эстонии по изотопным данным // Тезисы докладов Всесоюзной конференции по гидрогеологии. Звенигород, 1991. С. 60–62.
3. Yakovlev E.Yu., Tokarev I.V., Zikov S.V., Iglovsky S.A., Ivanchenko N.L. Isotope Signs ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, ^2H , ^{18}O) of Groundwater: An Investigation of the Existence of Paleo-Permafrost in European Russia (Pre-Volga region) // Water. 2021. Vol. 13. Art. number 1838. <https://doi.org/10.3390/w13131838>.

MECHANISMS DRIVING HYDROCHEMICAL EVOLUTION FROM $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ -DOMINATED TO $\text{HCO}_3\text{-Na}$ -DOMINATED GROUNDWATER IN TWO AQUIFERS OF THE ORDOS BASIN, NW CHINA

Jiang X.W., Wang R., Ji T.T., Tan Y., Liu Y.

MOE Key Laboratory of Groundwater Circulation and Environmental Evolution, China University of Geosciences, Beijing, China, jxw@cugb.edu.cn

Аннотация. Для всестороннего представления о процессах удаления Ca и Mg из подземных вод, в качестве объекта исследования использованы два водоносных горизонта, сложенных преимущественно силикатными породами, на территории Ордосского бассейна (Северо-Западный Китай). Установлено с использованием изотопов Sr, Mg и Ca, что в песчаниковом водоносном горизонте процесс растворения кальцита происходит в потоке от областей питания до областей разгрузки и является скрытым процессом, высвобождающим Ca, а образование глин и сорбция являются недооцененными механизмами, ответственными за удаление Ca и Mg в ходе гидрохимической эволюции. В водоносном горизонте лессовых отложений обнаружено, что растворение кальцита и сорбция не происходят на путях потока от областей питания до областей разгрузки.

Ключевые слова: гидрохимическая эволюция, катионный обмен, сорбция, образование глин

Abstract. To obtain a comprehensive understanding on all processes removing Ca and Mg in groundwater, we use two silicates-dominated aquifers in the Ordos Basin, NW China as the study site. In the sandstone aquifer, by using Sr, Mg and Ca isotopes, we identified that calcite dissolution occurring on flowpaths from recharge to discharge areas is a hidden process releasing Ca, and clay formation and adsorption are under-appreciated processes removing Ca and Mg on hydrochemical evolution. In the loess aquifer, we find calcite dissolution and adsorption do not occur on flowpaths from recharge to discharge areas.

Keywords: hydrochemical evolution, cation exchange, adsorption, clay formation

In basins with fresh groundwater, evolution from Ca-Mg- HCO_3 type groundwater in the recharge area to Na- HCO_3 type groundwater in the discharge area is widespread. Cation exchange is widely acknowledged to be a primary process responsible for removing Ca and Mg and releasing Na, but a quantitative understanding on all processes removing Ca and Mg is missing. In this study, we investigate mechanisms of hydrochemical evolution in two aquifers in the Ordos Basin, NW China. One aquifer is composed of Cretaceous sandstone, and the other aquifer is composed of Quaternary loess.

In the sandstone aquifer, we use Sr, Mg and Ca isotopes to identify main processes releasing and removing Ca and Mg. The trend of decreasing $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ indicates occurrence of calcite dissolution and gypsum dissolution along the flowpath. Based on Mg isotopes, we find clay formation, adsorption and cation exchange all contributed to removing Mg. For deep groundwater of ~104 years, clay formation removed 91.9 % of total Mg, whereas adsorption and cation exchange removed 3.8 % and 1.8 % of total Mg. Ca isotopes revealed that clay formation, adsorption, cation exchange and calcite precipitation all contributed to removing Ca, and the first two processes (clay formation and adsorption) removed 96.6 % of total Ca. We claim that the roles of clay formation and adsorption in removing Mg and Ca were under-appreciated in previous studies on hydrochemical evolution.

In the loess aquifer, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ does not change with flowpath, indicating that silicate and carbonate dissolution do not change with flowpath. We quantified the Ca and Mg released from silicate and carbonate weathering, and Ca and Mg removed from secondary processes. Based on mass balance calculation, we find adsorption does not occur in the loess aquifer, and all other three processes (clay formation, cation exchange and calcite precipitation) are responsible for removing Ca and Mg.

To sum up, by using metal isotopes, this study enhances understanding of hydrochemical evolution. However, research on the causes of occurrence of adsorption by clay minerals in the sandstone but disappearance of adsorption by clay minerals in the loess is still underway.

III. ГИДРОГЕОДИНАМИКА И РЕСУРСЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

УЧЕТ ВОПРОСОВ ОХРАНЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РАМОЧНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ РЕСУРСОВ ООН

Виноград Н.А.¹, Тудвачев А.В.²

¹*Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ),
Санкт-Петербург, nv.70@hotmail.com*

²*ООО «Водный центр СПбГУ», Санкт-Петербург*

Аннотация. Рабочая группа по ресурсам подземных вод была создана в 2019 г. для разработки дополнительных спецификаций к Рамочной классификации ресурсов Организации Объединенных Наций (РК ООН), первая редакция которой вышла в 2021 г. В ходе обсуждения этого документа широким кругом гидрогеологов и специалистов в области использования и охраны подземных вод было высказано много критических замечаний. В результате деятельность рабочей группы в 2024 г. была переориентирована на интеграцию вопросов учета и охраны подземных вод в оценку других видов минеральных ресурсов по оси Е РК ООН (социально-экономические и экологические проблемы). В настоящее время наряду с решением этой задачи обсуждается возможность возврата к созданию новой редакции дополнительных спецификаций по ресурсам подземных вод к РК ООН. Однако официальная переориентация и изменение целей рабочей группы пока этому препятствуют.

Ключевые слова: подземные воды, РК ООН, дополнительные спецификации, социально-экономические и экологические проблемы.

Abstract. Integration of groundwater protection issues into UNFC. The Working Group on Groundwater Resources was established in 2019 to develop supplemental specifications on groundwater resources for the United Nations Framework Classification of Resources (UNFC), the first edition of which was published in 2021. During the discussion of this document, a great number of critical comments from a wide range of hydrogeologists and experts on the groundwater protection and use, was received. As a result, the working group's activities in 2024 were refocused towards integrating the groundwater protection issues into the evaluation of other types of mineral resources on the E axis of the UNFC (socio-economic and environmental issues). Currently, along with addressing this task, the possibility of return to the further elaboration of the Supplemental Specifications on Groundwater Resources for the UNFC is discussed. However, official refocusing and change of group targets prevents this so far.

Keywords: groundwater, UNFC, supplemental specifications, socio-economic and environmental issues

Рамочная классификация ресурсов Организации Объединенных Наций (РК ООН) представляет собой основанную на проектах и принципах систему классификации ресурсов для определения экологической и социально-экономической жизнеспособности и технической осуществимости проектов по разработке ресурсов [4]. Рабочая группа по ресурсам подземных вод Экспертной группы по ресурсному менеджменту (EGRM) Европейской экономической комиссии (ЕЭК) ООН была создана в 2019 г. на сессии EGRM-10. Целью ее создания была разработка дополнительных спецификаций по ресурсам подземных вод к РК ООН. Первая редакция этого документа была опубликована в феврале 2021 г. [3], вторая редакция – в ноябре 2023 г. (в виде предварительного документа для публичных комментариев) [5]. На сессии EGRM в апреле 2024 г. документ не был принят, так как количество и содержание полученных комментариев ставили под сомнение саму необходимость и возможность создания дополнительных спецификаций по ресурсам подземных вод.

Наиболее существенные замечания касались, в частности, терминологии, использованной в документе. При этом оценки разделились: многие гидрогеологи подчеркивали несоответствие терминов принятым в гидрогеологии, в других отзывах отмечала необходимость упрощения терминологии для лучшего понимания неспециалистами в области подземных вод. При создании дополнительных спецификаций авторы должны были использовать терминологию, принятую в РК ООН. Члены рабочей группы по ресурсам подземных вод согласились с тем, что необходимо толкование используемых понятий, так как

существенно изменить термины, используемые в РК ООН, в большинстве случаев не представляется возможным. Для этого планируется создать специальный терминологический словарь, который станет частью новых методических рекомендаций по ресурсам подземных вод.

Некоторые «заинтересованные стороны», не связанные с Организацией Объединенных Наций, выразили серьезную обеспокоенность по поводу того, что внедрение РК ООН для проектов в области подземных вод непреднамеренно нарушает и подрывает право человека на воду и может восприниматься как путь к коммерциализации подземных вод за счет экосистем [6].

Большое количество замечаний от членов Международной ассоциации гидрогеологов (ИАН) показало необходимость более тесного сотрудничества с этой организацией. На 51-м Всемирном гидрогеологическом конгрессе ИАН, состоявшемся в сентябре 2024 г. в Давосе, помимо секционного доклада главы рабочей группы по ресурсам подземных вод Петера ван дер Кеура (Дания), была организована отдельная панель для обсуждения целесообразности создания дополнительных спецификаций по подземным водам к РК ООН и перспектив дальнейшей работы группы по ресурсам подземных вод. Большинство участников дискуссии согласились с высказанными замечаниями и отметили необходимость взаимодействия с ИАН, прежде всего в плане совершенствования терминологической базы. Для упрощения контактов между рабочей группой по ресурсам подземных вод и Международной ассоциацией гидрогеологов было предложено использовать сеть ИАН LUNA, созданную для взаимодействия с учреждениями ООН.

Итоги дискуссии в Давосе обсуждались членами рабочей группы на регулярных онлайн-встречах, руководители группы совещались с членами технической консультативной группы ЕЭК ООН. В результате в 2024 г. было принято решение о переориентации рабочей группы на интеграцию вопросов охраны подземных вод в работу других рабочих групп EGRM, занимающихся управлением ресурсами (добыча полезных ископаемых, подземные хранилища, геознергетика, включая использование термальной воды, и т.д.). Эта переориентация была согласована на EGRM-16 в марте 2025 г. Экспертная группа по ресурсному менеджменту одобрила предложенную переориентацию деятельности Рабочей группы по ресурсам подземных вод (EGRM-16/2025/INF.3) и подтвердила, что целью ее работы является защита ресурсов подземных вод, отметила важность согласования усилий по управлению подземными водами с передовой международной практикой и рассмотрения этого вопроса в качестве сквозного в сотрудничестве с другими секторальными рабочими группами Экспертной группы по ресурсному менеджменту [1].

План работы группы экспертов по управлению ресурсами на 2026 и 2027 гг. предусматривает сотрудничество с другими рабочими группами: по минералам, возобновляемым источникам энергии, проектам по закачке, антропогенным ресурсам. Рабочая группа будет уделять особое внимание критически важной роли подземных вод в других секторах природных ресурсов (например, в горнодобывающей промышленности, в геотермальной энергетике и в секторе хранения энергии) и их значимости в нексусе «вода – продовольствие – энергия – экосистема» (ВПЭЭ). Рабочая группа будет взаимодействовать с заинтересованными сторонами и международными партнерами, такими как «ООН – водные ресурсы» (включая Группу экспертов по подземным водам), Межправительственная гидрологическая программа ЮНЕСКО (МГП ЮНЕСКО), Конвенция по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер (Конвенция по воде), осуществляющая свою деятельность на базе ЕЭК, Международная ассоциация гидрогеологов (ИАН), «Водные ресурсы Европы» (Water Europe) и соответствующие геологические службы [2].

Для достижения поставленных целей выработан план работы до апреля 2026 г., когда состоится очередная сессия EGRM. План включает три основные задачи – анализ пробелов, привлечение заинтересованных сторон к работе группы, а также выполнение тематических

исследований, позволяющих применить на практике РК ООН с учетом вопросов охраны подземных вод [4]. Эти работы планируется осуществлять на постоянной основе.

На очередной сессии EGRM в апреле 2026 г. должны быть представлены первые итоги выполнения плана работ [2]:

- доклад об анализе пробелов, содержащий определение рисков, касающихся подземных вод, и возможность интеграции в различные сырьевые сектора;
- методические рекомендации по обеспечению устойчивости подземных вод в системах РК ООН и СУР ООН;
- материалы по передовой практике и тематические исследования: составление сборника тематических исследований, демонстрирующих эффективные меры по охране подземных вод в горнодобывающем, энергетическом и других ресурсных секторах.
- результаты сотрудничества с координационным центром ИАН по деятельности Организации Объединенных Наций (LUNA): укрепление взаимодействия с гидрогеологами, оказание текущей технической поддержки;
- система взаимодействия с заинтересованными сторонами: создание прозрачного механизма консультаций и взаимодействия для обеспечения согласованности со структурами ООН, государствами-членами и международными организациями.

Для реализации плана предполагается создать рабочие подгруппы, которые будут разрабатывать предложения по оценке подземных вод в системе РК ООН для заинтересованных сторон, связанных с подземными водами (которые их не используют); рассматривать оси G, F; и E (в соответствии с подготовленным обзором социально-экономической рабочей группы) и некоторыми новыми/существующими документами; рассматривать опыт применения РК ООН к подземным водам в некоторых государствах-членах ООН, мнения «заинтересованных сторон», считающих, что оценка подземных вод нарушает права человека, ЦУР и т.д.

На встрече рабочей группы по подземным водам, состоявшейся в январе 2026 г., было предложено, наряду с созданием методических рекомендаций по оценке подземных вод в связи с разработкой других видов ресурсов, создать отдельный документ для подземных вод как добываемых ресурсов и запасов, на который влияют другие виды использования порового пространства в недрах. Вместе с тем официальная переориентация и изменение целей рабочей группы, а также возможная негативная реакция «заинтересованных сторон» пока этому препятствуют.

Список литературы

1. Доклад Группы экспертов по управлению ресурсами о работе ее шестнадцатой сессии/ ECE/ENERGY/GE.3/2025/2. https://unece.org/sites/default/files/2025-06/EGRM-16_MeetingReport_ECE-ENERGY-GE-3-2025-2_r.pdf. Дата обращения - 13.01.2026.
2. План работы Группы экспертов по управлению ресурсами на 2026 и 2027 годы/ ECE/ENERGY/2025/6 / https://unece.org/sites/default/files/2025-08/ECE_ENERGY_2025_6_R.pdf. Дата обращения - 01.02.2026.
3. Проект Рамочной классификации ресурсов Организации Объединенных Наций. Дополнительные спецификации по ресурсам подземных вод. ECE/ENERGY/GE.3/2021/12 https://unece.org/sites/default/files/2021-03/ECE_ENERGY_GE.3_2021_12R.pdf. Дата обращения - 13.01.2026.
4. Рамочная классификация ресурсов Организации Объединенных Наций. Обновленный вариант 2019 года/ ООН, Женева, 2020. https://unece.org/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/publ/1922546_R_ECE_ENERGY_125_WEB.pdf. Дата обращения - 13.01.2026.
5. Draft United Nations Framework Classification For Resources. Supplemental Groundwater Specifications. Draft for Public Comment. UNECE, Nov 2023. - <https://unece.org/sites/default/files/2023-11/UNFC-SupplementalSpecs-GroundwaterResources-public-comments.pdf>. Дата обращения - 13.01.2026.
6. UNECE EGRM Groundwater Resources Working Group (GRWG) – Update. CSE-34/2025/INF.6. 17 September 2025 <https://unece.org/sites/default/files/2025-09/DRAFT%20Milestone%20Update%20from%20EGRM%20GRWG%20to%2034th%20session%20of%20CSE.pdf>. Дата обращения - 13.01.2026.

ОПЫТ ОЦЕНКИ ПОДЗЕМНОГО СТОКА ВОДОСБОРОВ МАЛЫХ РЕК МЕТОДОМ РАСЧЛЕНЕНИЯ ГИДРОГРАФА

Владимиров К.В.

Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии РАН им. Е.М. Сергеева,
Санкт-Петербург, vladimirov@hgepro.ru

Аннотация. Потенциал переноса радионуклидов в подземных водах в постэксплуатационный период проектируемого пункта подземного захоронения РАО в Красноярском крае во многом определяется инфильтрационным питанием – основным источником подземного стока рек. В статье представлены результаты оценки подземного стока рек Шумиха и Большая Тель с использованием методов цифровой фильтрации и природного трассера (электропроводности). Показано, что для малых рек наилучшие результаты дают цифровые фильтры Экхардта, Фьюри – Гупта, Чапмана и Боутона. Оценки подземного стока с использованием цифровых фильтров хорошо согласуются с результатами расчленения гидрографов по электропроводности и сопоставимы с независимыми определениями инфильтрационного питания по колебаниям уровней в скважинах.

Ключевые слова: базовый сток, расчленение гидрографа, цифровая фильтрация, электропроводность

Abstract. Radionuclide transport in groundwater during the post-operational period of the projected deep geological repository for RW in the Krasnoyarsk region is largely determined by groundwater recharge – the primary source of baseflow in rivers. The paper presents the results of baseflow estimation for the Shumikha and Bolshaya Tel rivers using digital filtering methods, and a natural tracer (electrical conductivity). It is demonstrated that for small rivers, the best results are achieved with Eckhardt, Furey – Gupta, Chapman, and Boughton digital filters. Baseflow estimates obtained via digital filters show good agreement with results from hydrograph separation based on electrical conductivity and are consistent with independent assessments of groundwater recharge derived from groundwater level fluctuations in observation wells.

Keywords: baseflow, hydrograph separation, digital filtering, electrical conductivity

Участок Енисейский вблизи г. Железногорска Красноярского края рассматривается как площадка для создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (далее – ПГЗРО). Одним из факторов, определяющих потенциал переноса радионуклидов в водоносной толще в постэксплуатационный период ПГЗРО, является инфильтрационное питание. Для его количественных оценок широко используются методы, основанные на выделении отдельных генетических составляющих речного стока. Среди данных методов на практике для малых водосборов чаще всего используются методы цифровой фильтрации, а также косвенные оценки с использованием трассеров.

Цель данной работы состоит в выборе оптимального метода расчленения гидрографа стока малых рек в условиях расчлененного рельефа на подземную и поверхностную составляющую.

Объектом исследования стали водосборные бассейны рек Шумиха и Большая Тель. Площадь исследуемого водосбора р. Шумиха ограничена гидропостом ГП-1 (водосборная площадь 9.2 км²) режимной наблюдательной сети ФГУП «НО РАО» и гидропостом в с. Большой Балчуг Среднесибирского УГМС (площадь 386 км²).

Реки Шумиха и Большая Тель при исследованиях принимались совершенными по степени дренирования подземных вод и несовершенными по характеру гидравлической взаимосвязи с подземными водами. Данные предпосылки принимались исходя из многолетних наблюдений за режимом подземных вод, распределением напоров по глубине, а также результатов гидрометрических съемок на р. Шумиха. Для гидропоста на р. Большая Тель совершенная степень дренирования подземных вод обосновывается его замыкающим для водосборной площади местоположением, а также близким расположением региональной дрены – р. Енисей. Р. Шумиха выше гидропоста ГП-1 и р. Большая Тель характеризуются естественным режимом с четко выраженным весенним половодьем и частыми дождевыми паводками в летне-осенний период. Наблюдаемые на реках ледовые явления (наледы) из-за своей маломощности и локальных проявлений не рассматриваются как отдельный тип питания рек и в дальнейшем не учитываются при расчленении гидрографов стока.

С гидрогеологической точки зрения, водосборная площадь р. Шумиха относится к Ангара-Канскому гидрогеологическому массиву трещинно-грунтовых вод. Верхнюю часть гидрогеологического разреза в районе участка Енисейский составляет локально обводненный горизонт четвертичных покровных отложений мощностью до 31.3 м, перекрывающий водоносную толщу, связанную с зоной экзогенной трещиноватости (до глубины 50–150 м) гнейсов раннеархейского возраста. Породы ниже по разрезу практически непроницаемые.

Водосборная площадь р. Большая Тель характеризуется наличием в разрезе водоносного комплекса неоген-четвертичных отложений, водоносного комплекса юрских отложений аллювиального, озерного и озерно-болотного генезиса и водоносного комплекса метаморфических и изверженных пород докембрия.

Количественная оценка подземного стока для двух рек основывалась на расчленении гидрографов наиболее распространенными методами цифровой фильтрации Лайн-Холлика [7], Чапмана, [3] Экхардта [4], Фьюри – Гупта [5] и Боутона [2]. Расчеты выполнены с применением программного кода grwat [1] и baseflow [9]. Для верификации полученных значений подземного стока р. Шумиха дополнительно проведена оценка подземного стока гидрохимическим методом, где в качестве трассера использовалась величина электропроводности.

Результатом применения цифровых фильтров является выделение базового стока реки. Базовый сток включает в себя не только инфильтрационное питание, но и другие источники, попадающие в реку с запаздыванием [6]. Разница между базовым стоком и подземным стоком может быть значительной, особенно для крупных водосборных площадей [8]. Для минимизации этой разницы в данной работе ключевые фильтр-параметры (α – константа рецессии, K – коэффициент рецессии, BFI – доля базового стока в общем стоке, C_1 – отношение поверхностного стока к осадкам, C_3 – отношение инфильтрационного питания к осадкам) подбирались таким образом, чтобы они характеризовали подземный сток реки.

Константа рецессии α подбиралась на основании анализа предварительно выделенных участков рецессии стока р. Большая Тель за временной промежуток с 2008 по 2022 г. Участки отвечали следующим критериям: отсутствие поверхностного стока, отсутствие инфильтрационного питания, минимальная эвапотранспирация, длительность рецессии – не менее пяти дней. Начало участка рецессии определялось исходя из длительности поверхностного стока:

$$t_{\text{пов}} = 0.8F^{0.2}, \quad (1)$$

где t – время, сут; F – площадь водосборного бассейна, км².

Далее, константа рецессии определялась по углу наклона аппроксимирующей прямой линии на графиках в координатах $-dQ/dt - Q$ и $Q - t$, где t – число дней после начала рецессии.

Коэффициент рецессии K рассчитывался по уклону аппроксимирующей прямой на графике в координатах $Q_n - Q_{n-1}$, где n – временной шаг, на который производятся расчеты.

Вместо отношения базового стока к общему стоку реки (BFI), в данной работе рассчитывалось отношение среднесуточного инфильтрационного питания к общему стоку реки. Инфильтрационное питание определялось по режиму подземных вод за период с 2018 по 2024 г. в двух наблюдательных скважинах, расположенных в водораздельной части бассейна р. Шумиха.

Используемые коэффициенты C_1 и C_3 в цифровом фильтре Фьюри – Гупта также рассчитывались исходя из известной величины инфильтрационного питания по двум скважинам:

$$C_1 = \frac{\text{поверхностный сток}}{\text{осадки}} = \frac{\text{общий сток} - \text{инфильтрация}}{\text{осадки}}, \quad (2)$$

$$C_3 = \frac{\text{инфильтрация}}{\text{осадки}}. \quad (3)$$

Результирующие параметры, принятые при расчетах с применением цифровых фильтров, представлены в таблице.

Параметры цифровых фильтров, принятые при расчетах базового стока

Константа рецессии α , 1/сут	Коэффициент рецессии K , б/р	BFI, д.е. (инфильтрация / общий сток)	C_1 , д.е (поверхностный сток / осадки)	C_3 , д.е. (инфильтрация / осадки)
0.16	0.85	0.55	0.176	0.216

Оценка подземного стока гидрохимическим методом основана на автономных, непрерывных и дискретных (1 замер в 10 минут) замерах электропроводности воды р. Шумиха.

Для выделения подземной составляющей стока реки использовано уравнение смешения:

$$C_r Q_r = C_b Q_b + C_q Q_q, \quad (4)$$

где Q – расход воды, м³/сут, C – электропроводность воды, мкСм/см, индексы r , b , q относятся к речному, базовому и быстрому стоку соответственно.

Базовый сток Q_b можно выразить через уравнение:

$$Q_b = \left(\frac{C_r - C_q}{C_b - C_q} \right) Q_r. \quad (5)$$

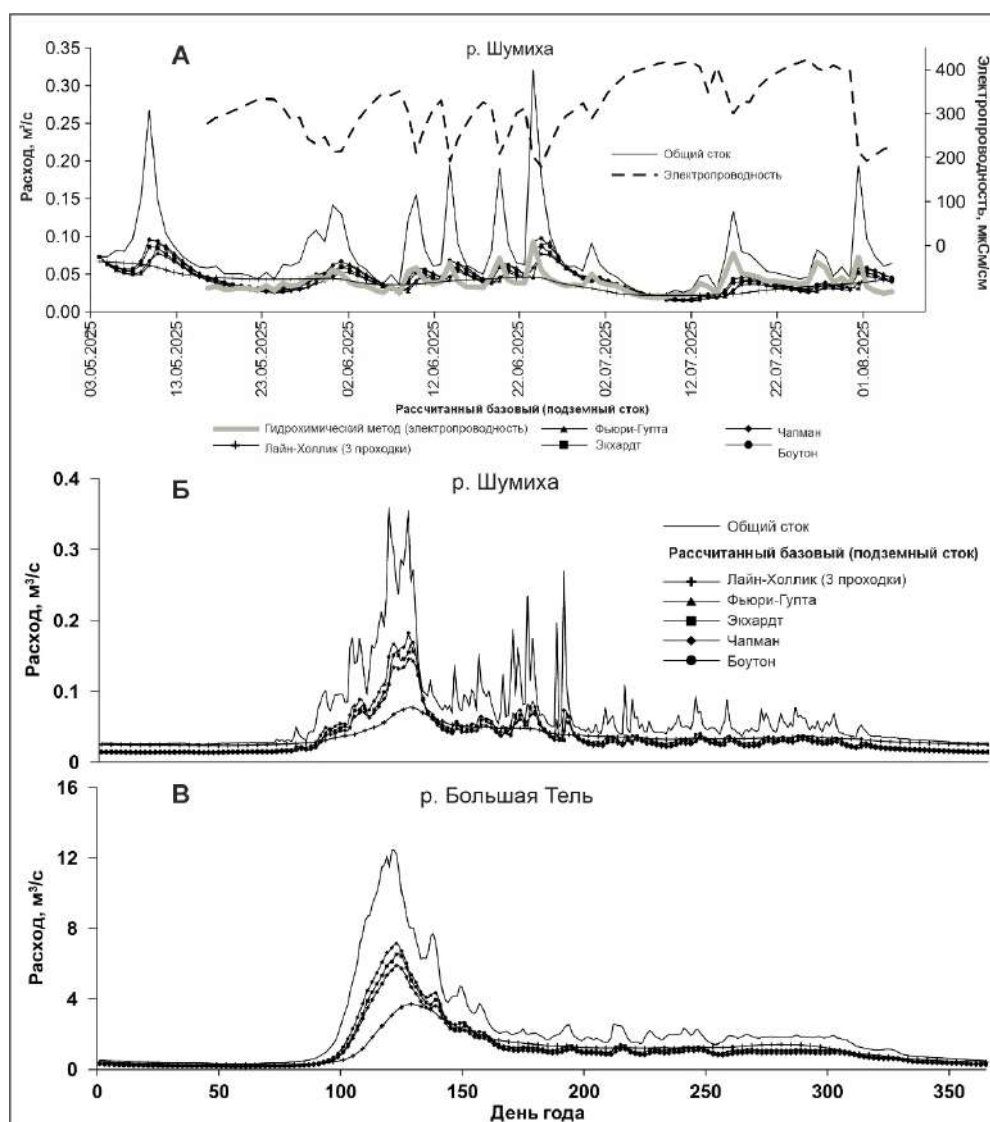
Значения C_b и C_q при расчетах задавались равными среднееголетнему значению электропроводности речной воды в периоды глубокой межени и измеренной электропроводности атмосферных осадков соответственно.

На рисунке представлены результаты расчетов подземного стока рек с помощью цифровых фильтров и гидрохимическим методом. Река Шумиха, при среднееголетнем слое общего стока 220 мм и модуле общего стока 7 л/с·км², имеет слой подземного стока от 114 до 136 мм в год в зависимости от выбранного цифрового фильтра. Полученный результат для водосборной площади р. Шумиха хорошо коррелирует с данными, полученными при расчетах инфильтрационного питания на основе колебаний уровня в скважинах (от 88 до 178 мм в год при среднееголетнем значении 123 мм). Очевидно, такой результат достигнут за счет использования рассчитанного инфильтрационного питания при обосновании параметров BFI, C_1 и C_3 . Независимые результаты выделения подземного стока гидрохимическим методом в весенне-летний период 2025 г. (40 мм слоя подземного стока) хорошо сопоставимы с методами цифровой фильтрации (от 37 до 44 мм).

Река Большая Тель, при большей водосборной площади, имеет среднееголетний слой общего стока 185 мм и модуль общего стока 5.8 л/с·км² и характеризуется величиной слоя подземного стока от 91 до 126 мм в год.

Обращаясь к внутригодовой динамике подземного стока, следует отметить, что использованные цифровые фильтры не учитывают процессы берегового регулирования. Рассчитанный подземный сток при прохождении пика половодья и крупных паводков не уменьшается, а растет. Как показали наблюдения в скважинах, расположенных в непосредственной близости от русла р. Шумиха, градиенты потока уменьшаются не более чем на 10 % при прохождении пика половодья, после чего начинается их рост. Таким образом, представленная в работе методика расчета может давать несколько завышенные значения подземного стока во время паводков и половодья, но позволяет корректно оценить подземный сток за многолетний период.

Подводя итоги проведенного исследования, можно резюмировать, что для оценки среднееголетних величин подземного стока малых рек можно использовать цифровые фильтры Чапмана, Экхардта, Фьюри – Гупта и Боутона, содержащие в себе параметры, обоснование которых следует проводить на основе гидрогеологических характеристик (периоды рецессии подземного стока и инфильтрационное питание).



Результаты расчленения: гидрографа гидрохимическим методом и с помощью цифровых фильтров за весенне-летний период 2025 г. (А); гидрографов (среднегодовые суточные значения) рек Шумиха (Б) и Большая Тель (В) с помощью цифровых фильтров.

Список литературы

1. Рец Е., Киреева М., Самсонов Т., Езерова Н., Горбаренко А., Фролова Н. Алгоритм автоматизированного расчленения гидрографа по методу Б.И. Куделина GRWAT: проблемы и перспективы // Водные ресурсы. 2022. № 49. С. 27–42.
2. Boughton W.C. A hydrograph-based model for estimating water yield of ungauged catchments // Institute of Engineers Australia National Conference. 1993. V. 93(14). P. 317–324.
3. Chapman T.G. Comment on “evaluation of automated techniques for baseflow and recession analyses” by R.J. Nathan and T.A. McMahon // Water Resources Research. 1991. V. 27. P. 1783–1784.
4. Eckhardt K. How to Construct Recursive Digital Filters for Base-Flow Separation // Hydrological Processes. 2005. V. 19. P. 507–515.
5. Furey P.R., Gupta V.K. Tests of two physically based filters for base flow separation // Water resources research, 2003. V. 39(10):1297.
6. Hall F.R. Base flow recessions – a review // Water Resources Research. 1968. V. 4(5). P. 973–983.
7. Lyne V., Hollick M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling // Proceedings of the Institute of Engineers Australia National Conference, Perth, Australia. 1979. P. 22–26.
8. Pozdniakov S.P., Wang P., Grinevsky S.O., Frolova N.L. A physically based model of a two-pass digital filter for separating groundwater runoff from streamflow time series // Water Resources Research. 2022. V. 58(3).
9. Xie J., Liu X., Jasechko S., Berghuijs W.R., Wang K., Liu C., Reichstein M., Jung M., Koirala, S. Majority of global river flow sustained by groundwater // Nature Geoscience. 2024. V. 17(8). P. 770–777.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ МОСКОВСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА (НА ПРИМЕРЕ ПОЛИГОНА ИДГ РАН «МИХНЕВО»)

Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Петухова С.М.

*Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва,
emgorbunova@bk.ru*

Аннотация. Данные многолетнего гидрогеологического мониторинга в скважинах, расположенных на полигоне ИДГ РАН «Михнево», использованы для анализа влияния естественных и техногенных факторов на режим подземных вод центральной части Московского артезианского бассейна. Водоносные горизонты, развитые в зоне активного водообмена, характеризуются годовой циклическостью. Амплитуды среднемноголетних суточных вариаций уровней возрастают от 0.4 м в верхней водоносной толще до 1.3 м в нижнем водоносном комплексе и зависят от фильтрационных свойств водовмещающих пород. В режиме подземных вод, очищенном от атмосферного давления, отчетливо выделяются интервалы питания, квазистационарного состояния и разгрузки. Дополнительно в верхнем слабонапорном горизонте прослеживается влияние техногенной нагрузки, в нижнем напорном комплексе – гидрогеологический отклик на земные приливы.

Ключевые слова: природная геосистема, мониторинг, режим подземных вод, годовая циклическость, техногенные факторы

Abstract. Data from long-term hydrogeological monitoring in wells located at the Mikhnevo site of the Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences were used to analyze the influence of natural and anthropogenic factors on the groundwater regime of the central part of the Moscow Artesian Basin. Aquifers developed in the zone of active water exchange are characterized by annual cyclicality. The amplitudes of average annual daily variations in water levels increase from 0.4 m in the upper aquifer to 1.3 m in the lower aquifer complex and depend on the filtration properties of the water-saturated rocks. In the groundwater regime, cleared from atmospheric pressure, intervals of recharge, quasi-steady-state, and discharge are clearly distinguished. Additionally, the influence of anthropogenic loading is visible in the upper low-pressure aquifer, and the hydrogeological response to tides is evident in the lower pressure complex.

Keywords: natural geosystem, monitoring, groundwater regime, annual cyclicality, technogenic factors

Полигон «Михнево» отнесен к природной геосистеме, так как расположен на северо-восточной окраине Приокско-Террасного государственного природного биосферного заповедника, на расстоянии 80 км южнее Москвы и удален от зоны активного техногенного влияния на геологическую среду. Климат района умеренно континентальный, с холодной зимой и теплым летом, атмосферное давление изменяется от 925 до 1010 ГПа. Летние периоды наблюдений характеризуются незначительными вариациями давления в пределах 30 ГПа в отличие от зимних.

В пределах полигона «Михнево» основное распространение получают каширский слабонапорный водоносный горизонт среднего карбона и алексинско-протвинский напорный водоносный комплекс нижнего карбона, разделенные региональным водоупором – верейскими глинами среднего карбона. Водовмещающими породами являются неравномерно трещиноватые известняки с подчиненными прослоями глин, доломитов и мергелей. Интенсивность кавернозности и трещиноватости разновозрастных отложений с глубиной уменьшается. В каширском горизонте выделены два подгоризонта – лопасненский в интервале 10.2–26.5 м в скважине 1М глубиной 30 м и нарский – в интервале 32.1–56.6 м в скважине 2М глубиной 60 м, разделенные между собой глинистой хатунской толщей мощностью 5.5 м. Расстояние между скважинами 1М и 2М составляет 1 м. В нижнем алексинско-протвинском водоносном комплексе, вскрытом в скважине 3М глубиной 115 м, расположенной на расстоянии 3 м от скважины 2М, величина напора достигает 26 м. По данным расходомерии в скважине 2М водопиток выделен в интервале 48.5–52.0 м, в скважине 3М – в интервалах 92–94 и 99–100 м.

Анализ фоновых вариаций уровней подземных вод выполнен по данным многолетнего гидрогеологического мониторинга, проводимого в скважине 1М с 2004 г., 2М с 2006 г., 3М с 2013 г. При суточных измерениях уровня подземных вод используются электроуровнемеры.

Автоматическая регистрация уровня с частотой опроса 200 Гц осуществляется датчиками гидростатического давления (LMP308i), установленными в скважинах 3М в феврале 2008 г. и 2М – в марте 2013 г. Гидрогеологический аппаратурно-измерительный комплекс укомплектован датчиком атмосферного давления (РАА-33Х) в 2020 г. и входит в состав уникальной научной установки «Среднеширотный комплекс геофизических наблюдений "Михнево"» (УНУ СКГН «Михнево») ИДГ РАН (Московская область) с единой системой синхронизации времени регистрации [4].

За период наблюдений сформирована единая база суточных и ежесекундных измерений уровня подземных вод в скважинах, расположенных на полигоне ИДГ РАН «Михнево». Обработка данных выполняется стандартным способом, которая включает построение ежемесячных диаграмм вариаций атмосферного давления, уровня подземных вод, исходных и очищенных от влияния атмосферного давления. Дополнительно проводится сбор информации по метеопараметрам (температура воздуха и количество осадков) по ближайшей метеостанции г. Серпухова. Ежегодные сведения по изменениям абсолютных отметок уреза поверхностного водотока – р. Оки по гидропостам ГУ “Московского ЦГМС-Р”, расположенным в г. Серпухов и г. Пушкино, предоставлены Отделом гидрологии Центрального управления гидрометеослужбы РФ. Для анализа внутригодовой цикличности режима подземных вод использованы программные пакеты, составленные в среде MatLab, для расчета спектрограмм месячных и суточных колебаний уровня подземных вод, спектральной плотности мощности по выбранным рядам экспериментальных данных.

Природная геосистема характеризуется естественным, относительно ненарушенным режимом подземных вод. Своеобразие местного ландшафта контролирует условия формирования поверхностного и подземного стока. В верхней части гидрогеологического разреза преобладает радиальный тип подземного стока по направлению от водоразделов к эрозионной сети, который определяет режим каширского водоносного горизонта. Нижняя часть разреза характеризуется латеральным типом подземного стока в северо-восточном направлении и обуславливает режим нижнего алексинско-протвинского водоносного комплекса.

В режиме каширского водоносного горизонта и алексинско-протвинского водоносного комплекса наряду с многолетними циклами продолжительностью около 5 лет прослеживается годовая цикличность в виде подъема уровня в паводок и последующей разгрузки в меженный период. За период наблюдений 2019–2025 гг. определены среднемноголетние суточные максимальные, минимальные и средние значения вариаций уровня (таблица).

Среднемноголетние суточные вариации уровней в наблюдательных скважинах 1М-3М на полигоне «Михнево» (данные от поверхности земли, абсолютная отметка устья скважин 167 м)

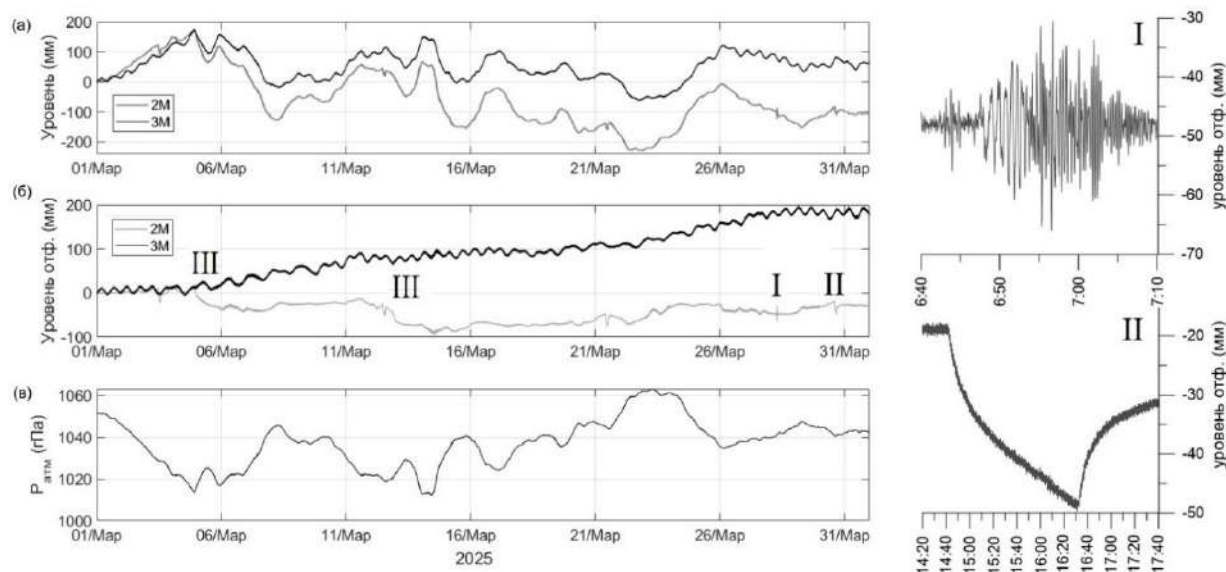
Значение, м	Скважина 1М			Скважина 2М			Скважина 3М		
	мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.
мин.	25.13	25.58	25.81	43.05	44.48	45.49	62.59	64.27	66.09
сред.	25.51	25.75	25.95	43.98	45.07	46.15	63.80	65.05	66.48
макс.	25.70	25.94	26.36	44.71	45.58	46.48	64.57	65.55	67.08
Амплитуда	0.57	0.36	0.55	1.66	1.10	0.99	1.98	1.28	0.99

Наиболее устойчиво сезонность колебаний уровня проявляется по минимальным среднесуточным значениям. В нижезалегающем алексинско-протвинском водоносном комплексе подъем уровня регистрируется в первых числах февраля, в нарской толще каширского горизонта – в середине февраля, в верхней лопасненской толще – в начале марта. Соответственно, в нижнем горизонте установлено более раннее наступление экстремальных значений и меньшая продолжительность подъема уровня.

При сопоставлении среднемноголетних суточных амплитуд вариаций уровней прослеживается закономерное увеличение значений от 0.36 м в верхней лопасненской толще

до 1.1 и 1.28 м в нижезалегающих нарской толще каширского водоносного горизонта и алексинско-протвинском водоносном комплексе соответственно в связи с уменьшением фильтрационных свойств водовмещающих пород с глубиной. Наибольшие диапазоны среднемноголетних минимальных суточных вариаций уровня до 2 м установлены в алексинско-протвинском водоносном комплексе, который характеризуется меньшей проницаемостью трещинно-порового коллектора по сравнению с вышезалегающими кавернозными известняками [3]. Таким образом, в естественных условиях на полигоне «Михнево» среднегодовые диапазоны вариаций уровня подземных вод возрастают от 0.4–0.6 м до 1–2 м при увеличении глубины залегания горизонта.

В гидрогеологических данных, очищенных от влияния атмосферного давления, отчетливо выделяются интервалы, соответствующие периодам питания – разгрузки и квазистационарного режима фильтрации. Например, по результатам мониторинга 2025 г. в нижнем водоносном комплексе скорость подъема уровня за счет привлечения естественных ресурсов относительно постоянна и не превышала 0.2 м/месяц с января по апрель (рисунок).



Исходные (а) и очищенные от атмосферного давления (б) относительные вариации уровня верхнего слабонапорного каширского водоносного горизонта (скв. 2М) и нижнего напорного алексинско-протвинского водоносного комплекса (скв.3 М), диаграмма вариаций атмосферного давления (в) (март 2025 г.) (справа на врезке детально показан отклик на землетрясение в Мьянме 28.03.2025 г. M7.7 (I), пример мини- депрессионной воронки 30.03.2025 г. (II), на диаграмме скачкообразное снижение (III) соответствует влиянию регионального водоотбора).

В мае установлено относительно равновесное состояние между притоком и оттоком подземных вод. С июня по сентябрь прослежено снижение уровня со скоростью от 0.1 до 0.3 м/месяц, сменившееся постепенным восстановлением уровня. В вариациях уровня нижнего напорного водоносного комплекса отчетливо выделяются гидрогеологические отклики на земные приливы. Максимальные значения амплитуд суточных и полусуточных вариаций приливов в уровне до 2 см отмечены в марте и сентябре. Данные по откликам на земные приливы, выделенные в вариациях уровня напорного горизонта, используются для дистанционной оценки фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора [2].

Режим вышезалегающего каширского водоносного горизонта отличается от нижнего алексинско-протвинского водоносного комплекса. Скорость снижения уровня в осенне-зимний и летний период не превышает 0.1 м/месяц. Основное кратковременное питание верхний горизонт получает в апреле и сентябре. Квазистационарный режим фильтрации в верхнем водоносном горизонте прослежен в июле с запаздыванием относительного нижнего водоносного комплекса. Подземные воды полигона ИДГ РАН «Михнево» находятся вне зоны

развития региональной депрессионной воронки, охватывающей центральную часть Московского региона. Тем не менее режим верхнего каширского водоносного горизонта эпизодически осложнен влиянием регионального и локального водоотбора. Региональный водоотбор отчетливо выделяется на месячных диаграммах, очищенных от влияния атмосферного давления, в виде скачкообразного снижения уровня в течение первых суток на 0.1–0.2 м с последующим частичным восстановлением естественных запасов. Локальный водоотбор из технической скважины, расположенной на территории полигона на расстоянии 0.3 км от наблюдательной скважины 2М, проявляется в виде формирования мини-депрессионных воронок с максимальным снижением до 3–5 см в течение от 1-2 до 3-4 час [1]. Для более детального анализа выделенной внутригодовой цикличности режима подземных вод построены спектрограммы месячных и суточных колебаний уровня. Использованный подход позволил оценить интенсивность сезонного восполнения естественных запасов и определить соответствующие им диапазоны частот. Также для обработки гидрогеологических данных может быть применен вероятностный подход и рассчитана спектральная плотность мощности (СПМ) для заданных интервалов. На построенных диаграммах выделены интервалы частот, которые характеризуются изменением моды между заданными процентилями.

В соответствии с принципами гидрогеологического районирования, территория полигона ИДГ РАН «Михнево» относится к провинции сезонного (преимущественно весеннего и частично осеннего) питания подземных вод и области умеренного дренирования с глубиной эрозионного вреза до 200 м. На основе предварительного анализа многолетних данных гидрогеологического мониторинга за период наблюдений 2019–2025 гг. на полигоне «Михнево», приуроченном к центральной части Московского артезианского бассейна, прослежена годовая цикличность режима подземных вод. Определены диапазоны среднемноголетних суточных вариаций уровней разновозрастных водоносных горизонтов. Отмечено закономерное увеличение амплитуд сезонных вариаций уровней подземных вод в разрезе при уменьшении проницаемости водонасыщенных коллекторов.

В вариациях уровня подземных вод, очищенных от влияния атмосферного давления, установлены основные интервалы питания – разгрузки. Интервалы квазистационарного режима фильтрации, соответствующего равновесию между питанием и разгрузкой подземных вод, выделенные в нижнем напорном алексинско-протвинском водоносном комплексе, являются информативными для оценки проницаемости коллектора на основе приливного анализа. Режим верхнего слабонапорного каширского водоносного горизонта осложнен региональным и локальным водоотбором, приводящим к скачкообразным снижениям уровня с частичным восстановлением. Соответственно, при разработке Приокского месторождения подземных вод следует учитывать сформированный радиус техногенного влияния действующих водозаборов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН (тема 125012200570-5).

Список литературы

1. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Свинцов И.С. Оценка проницаемости трещинно-порового коллектора при эпизодическом техногенном воздействии // Динамические процессы в геосферах. Вып.8. Сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2016. №. 8. С. 42–52.
2. Петухова С.М., Беседина А.Н., Горбунова Э.М. Программа ЭВМ "Оценка фильтрационных свойств флюидонасыщенного коллектора"// 2023680306 - регистрационный. 2023.
3. Besedina A.; Gorbunova E.; Petukhova S. Hydrogeological responses to distant earthquakes in aseismic region. Water. 2023. 15. 1322. <https://doi.org/10.3390/w15071322>.
4. Kocharyan G.G., Loktev D.N., Ryakhovsky I.A., Sanina I.A. Large-Scale research facilities «Mid-Latitude Geophysical Observation Complex "Mikhnevo"». Geodynamics & Tectonophysics. 2022. 13 (2), 0590. doi:10.5800/GT-2022-13-2-0590.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ РЕГИОНАЛЬНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОДЗЕМНОГО СТОКА НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Гриневский С.О.¹, Поздняков С.П.¹, Григорьев В.Ю.², Лехов В.А.¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, sogrinev@mail.ru

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва

Аннотация. Оценка среднееголетних величин подземного стока для европейской территории России в современный (2008–2022 гг.) и предшествующий (до 1980 г.) периоды проведена методами расчленения речного гидрографа. На основе этих данных получены выводы о том, что различие структурно-гидрогеологического строения зоны интенсивного водообмена Московского и смежных артезианских бассейнов определяет разный характер климатической зональности подземного стока в их границах. Климатическая зональность проявляется и в долеом соотношении подземного стока с общим речным стоком. Современные климатические изменения вызвали однонаправленное увеличение подземного стока на всей европейской территории России несмотря на структурно-гидрогеологические различия строения артезианских бассейнов. При этом различия относительных изменений подземного стока на площади артезианских бассейнов связаны с неоднородностью их ландшафтных условий.

Ключевые слова: подземный сток, ресурсы подземных вод, изменение климата, артезианский бассейн

Abstract. An assessment of mean annual groundwater flow values for European Russia in the current (2008–2022) and previous (pre-1980) periods was conducted using river hydrograph dissection methods. Based on these data, it was found, that differences in the hydrogeological structure of the intensive water exchange zone of the Moscow and adjacent artesian basins determine the different climatic zonality of groundwater flow within their boundaries, which is also reflected in its proportional relationship to total river flow. Recent climate change has caused a consistent increase in groundwater flow throughout the European part of Russia, despite hydrogeological differences of artesian basins. Furthermore, differences in relative changes in groundwater flow within artesian basins are associated with the heterogeneity of their landscape conditions.

Keywords: groundwater flow, groundwater resources, climate change, artesian basin

Гидролого-гидрогеологический метод оценки подземного стока, основанный на расчленении гидрографа речного стока [6], традиционно используется для региональной оценки ресурсов подземных вод зоны интенсивного водообмена. Для территории России такие обобщения в виде карт подземного стока СССР [4], Нечерноземной зоны РСФСР [2] и др. были выполнены в начале 80-х гг. прошлого века.

Пространственная неоднородность подземного стока европейской территории России на этих картах отражает различия гидрогеологического строения и мощности зоны интенсивного водообмена, при этом влияние широтной климатической зональности прослеживается только в минимальных значениях подземного стока в самых южных регионах. Однако с начала 80-х гг. прошлого века под влиянием происходящих климатических изменений для большей части исследуемой территории отмечается статистически значимый рост минимального стока рек, характеризующего их подземное питание [1, 7, 8].

Целью проведенных исследований являлся анализ закономерностей наблюдаемых климатических изменений подземного стока в различных структурно-гидрогеологических регионах европейской территории России, представленных Московским и смежными артезианскими бассейнами (АБ).

Оценка подземного стока на рассматриваемой территории проведена на основе расчленения гидрографов речного стока по 538 постам за период с 2008 по 2022 г. и по 283 постам за период до 2008 г. На основе зависимости модуля подземного стока от площади водосбора для дальнейшего анализа были выбраны 69 речных бассейнов, на площади которых происходит полное дренирование подземных вод зоны интенсивного водообмена.

В качестве климатических характеристик рассматриваемой территории использованы среднееголетние значения годовых сумм осадков и испаряемости за период 1981–2010 гг. из базы данных проекта CHELSA с пространственным разрешением 30 угловых секунд [10].

Структурно-гидрогеологические различия Московского и смежных АБ охарактеризованы на основе схем строения зоны интенсивного водообмена, построенных для рассматриваемой территории по материалам карт подземных вод масштаба 1:1 000 000 [5].

Минимальные площади речных бассейнов с полным дренированием подземных вод зоны интенсивного водообмена в разных АБ существенно различаются и варьируются от 2 до 5 тыс. км², что обусловлено структурно-гидрогеологическими особенностями строения АБ. Анализ среднееголетних значений модуля (слоя) речного R и подземного M стока за период 2008–2022 гг. показывает «климатическую обусловленность» общего речного стока на рассматриваемой территории, при которой его различия удовлетворительно описываются известной модификацией уравнения М.И. Будыко [11] в зависимости от средних значений слоя осадков P и потенциальной эвапотранспирации ET_0 из базы данных CHELSA при ландшафтном коэффициенте $\omega = 3.8$:

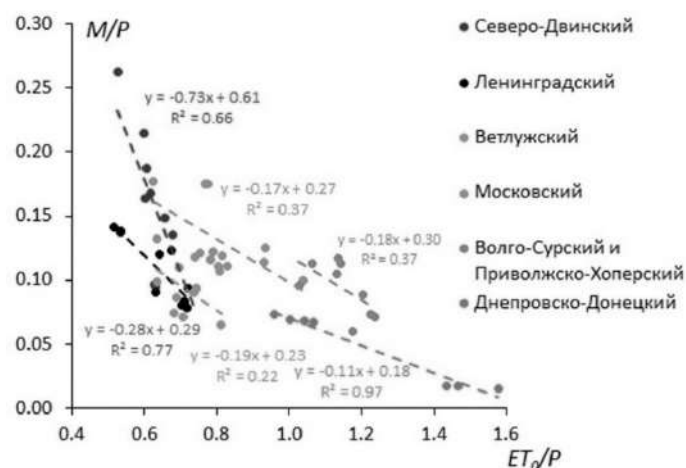
$$\frac{R}{P} = \left[1 + \left(\frac{ET_0}{P} \right)^\omega \right]^{1/\omega} - \frac{ET_0}{P}.$$

Значения среднееголетнего модуля подземного стока на рассматриваемой территории варьируются от 0.25 до 6 л/с км² [3]. При этом связь доли слоя подземного стока от осадков M/P с индексом аридности ET_0/P в границах всей европейской территории России неоднозначна и проявляется только в границах отдельных АБ. При этом характер этой связи существенно различается в разных АБ (рисунок), откуда следует, что климатические факторы оказывают различное влияние на формирование подземного стока в зависимости от структурно-гидрогеологического строения АБ.

Различие «климатической зависимости» подземного стока АБ выражается в разных угловых коэффициентах на графиках (рисунок); при этом прослеживается их корреляционная связь с обобщенными показателями фильтрационного строения АБ, характеризующими интенсивность инфильтрационного водообмена.

Сопоставление среднееголетних значений минимальных 30-суточных расходов летней и зимней межени за периоды 1950–1979 и 1980–2022 гг. показало, что однозначно проявляющиеся в пределах исследуемой территории с 1980-х гг. климатические изменения [9] вызвали увеличение среднееголетних модулей подземного стока: максимально (до 80 %) – в Приволжско-Хоперском АБ, а минимально (на 25 %) – в Северо-Двинском. Также по всем бассейнам, за исключением Северо-Двинского, рост минимального зимнего стока превышает увеличение летнего [3]. При этом в масштабах относительного изменения подземного стока разных АБ прослеживается не только широтная климатическая зональность, но и связь с обобщенными показателями их фильтрационного строения.

В то же время, несмотря на схожие региональные тенденции климатических изменений средних величин минимального стока в современный период, вариация их изменчивости в разных речных бассейнах на площади АБ существенно выше. Это, вероятно, связано с ландшафтными различиями отдельных речных водосборов, при которых однонаправленные климатические изменения по-разному проявляются в процессах формирования общего водного баланса и инфильтрационного питания подземных вод в зависимости от ландшафтных условий [9]. Несмотря на существенные различия климатических условий на территории европейской России, региональная широтная изменчивость подземного стока выражена слабо. Климатические факторы формирования подземного стока гораздо заметнее проявляются в границах отдельных АБ. При этом особенности гидрогеологического строения зоны интенсивного водообмена АБ определяют степень влияния климатических факторов на формирование подземного стока в их границах.



Связь доли подземного стока от осадков (M/P) с индексом аридности (ET_0/P).

Происходящие с 1980-х гг. изменения климатических условий вызвали однонаправленное региональное увеличение среднего модуля подземного стока. Максимальное увеличение модуля подземного стока произошло в южной части исследуемой территории, а минимальное – в северной; при этом прослеживается связь масштабов изменения подземного стока в разных АБ с обобщенными показателями их фильтрационного строения. На юге исследуемой территории также отмечается высокая неоднородность климатических изменений подземного стока в разных речных бассейнах, что, вероятно, обусловлено более существенным влиянием ландшафтных факторов на климатические преобразования процессов инфильтрационного водообмена в зонах умеренного и недостаточного увлажнения.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант №24-17-00102.

Список литературы

1. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волги // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 75–85.
2. Всеволожский В.А. и др. Карта подземного стока Нечерноземной зоны РСФСР (за исключением Калининградской области, горной части Урала и Зауралья). Масштаб 1:1500 000. М., 1984.
3. Гриневский С.О., Поздняков С.П., Григорьев В.Ю., Лехов В.А. Климатические закономерности формирования подземного стока на Европейской территории России // Вестник Московского ун-та. Сер. 4: Геология. 2025. № 6. С. 147–155.
4. Карта естественных ресурсов подземных вод СССР (подземного стока зоны интенсивного водообмена). Масштаб 1:7500000. Под ред. И.С.Зекцера, О.В.Попова. М.: ГУГК. 1982.
5. Карты подземных вод. Листы М37, N36, N37-38, N38-39, O35-36, O37-38, O39, P37. Масштаб 1:1000000. М.: ВСЕГЕИ, «Аэрогеология», 1998–1999.
6. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М: Изд-во МГУ, 1960. 343 с.
7. Научно-прикладной справочник: Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации. Под ред. В.Ю.Георгиевского СПб.: ООО "РИАЛ", 2021. 190 с.
8. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В. Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: Обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. 49(3). С. 251–269.
9. Grinevskiy S.O., Pozdniakov S.P., Dedulina E.A. Regional-Scale Model Analysis of Climate Changes Impact on the Water Budget of the Critical Zone and Groundwater Recharge in the European Part of Russia // Water. 2021. V. 13(4):428.
10. Karger D.N., Conrad O., Böhner J., Kawohl T., Kreft H., Soria-Auza R.W., Zimmermann N.E., Linder P., Kessler M. Climatologies at high resolution for the Earth land surface areas // Scientific Data, 2017. V. 4: 170122.
11. Zhang L., Hickel K., Dawes W.R., Chiew F.H.S., Western A.W., Briggs P.R. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration // Water Resources Research. 2004. V. 40(2):02502.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОДЗЕМНОГО СТОКА АРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ИЗУЧЕННОСТИ

Егоров Т.С., Дубровин К.А., Козлов Ю.А.
ФГБУ «Гидроспецгеология», Москва, tsegorov@mail.ru

Аннотация. Проведен анализ подходов к количественной оценке подземного стока с использованием уравнения водного баланса на трех ключевых арктических территориях: полуострове Ямал, в северо-западной части Таймыра (Диксон) и междуречье низовий рек Лены и Омолая (Тикси). Установлены закономерности формирования подземного стока в надмерзлотных водах и водах сквозных таликов, а также выявлена его зависимость от криогенных условий и климатических факторов. Отмечена необходимость актуализации оценок подземного стока в связи со слабой гидрогеологической изученностью и высокой климатической изменчивостью Арктических регионов.

Ключевые слова: подземный сток, Арктика, талики, сезонноталый слой, климатические изменения

Abstract. An analysis of approaches to quantitative assessment of groundwater discharge using the water balance equation was carried out for three key Arctic territories: the Yamal Peninsula, the northwestern part of Taimyr (Dikson), and the interfluvium of the lower reaches of the Lena and Omoloy rivers (Tiksi). Regularities in the formation of groundwater discharge in suprapermfrost waters and through taliks were identified, along with its dependence on cryogenic conditions and climatic factors. The necessity of updating groundwater discharge estimates is emphasized due to the poor hydrogeological exploration and high climatic variability of the Arctic region.

Keywords: groundwater discharge, Arctic region, taliks, active layer, climate change

Арктические регионы характеризуются уникальными гидрогеологическими условиями: преобладанием многолетнемерзлых пород (ММП), коротким периодом активного водообмена, высокой пространственной неоднородностью почвенно-грунтового покрова и значительной чувствительностью к климатическим изменениям. Подземный сток – важнейшая компонента водного баланса, особенно в зимний период, когда поверхностный сток ограничен или отсутствует. Несмотря на важность этого параметра, его количественная оценка в Арктике остается недостаточно изученной. Традиционные методы, разработанные для умеренных широт, часто неприменимы без существенной модификации. Цель настоящей работы – систематизировать и адаптировать подходы к региональной оценке подземного стока в сложных геолого-гидрогеологических условиях на примере трех территорий: п-ова Ямал, северо-западной части п-ова Таймыр (Диксон) и междуречья низовий рек Лена и Омолай (Тикси).

По гидрогеологическим условиям исследуемые территории в упрощенном виде представлены двухслойной водоносной системой, разделенной выдержанной толщей ММП: надмерзлотными водами и водами сквозных таликов и подмерзлотными водами. Ресурсы надмерзлотных вод и вод сквозных таликов формируются преимущественно за счет инфильтрации атмосферных осадков. Подмерзлотные воды, как правило, гидравлически изолированы от вышележащих подразделений (за исключением зон сквозных таликов), и их ресурсы формируются в основном естественными (емкостными) запасами. В данной работе анализируется подземный сток, формирующийся в верхней части разреза.

В пределах исследуемых территорий надмерзлотные воды и воды сквозных таликов приурочены преимущественно к четвертичным образованиям. Надмерзлотные воды здесь разделяются [7] на воды несквозных таликов и воды сезонноталого слоя (СТС). Несквозные талики локализуются вблизи небольших водоемов и водотоков, их мощность варьируется от первых до нескольких десятков метров, увеличиваясь в южном направлении и уменьшаясь к северу. Воды сезонноталого слоя приурочены к верхней части четвертичных образований, мощность талой части зависит от литологического состава пород и не превышает 2.5–3.0 м.

Оценка подземного стока надмерзлотных вод и вод сквозных таликов требует учета не только гидрогеодинамических и гидрогеохимических параметров, но и гидрологических условий, климатических характеристик, геокриологической обстановки. Для количественной оценки подземного стока использовано уравнение водного баланса (1) [2]:

$$O = E + TR + C + W \pm V, \quad (1)$$

где O – атмосферные осадки; E – суммарное испарение (с поверхности растительности, снега и почвы); TR – транспирация растительностью; C – поверхностный сток; W – подземный сток; V – влагозапасы зоны аэрации.

В упрощенной форме уравнение (1) можно выразить через коэффициент подземного стока (λ) (2):

$$W = \lambda O, \quad (2)$$

где величина подземного стока в условиях распространения ММП зависит от влагоемкости зоны аэрации и продолжительности ее талого состояния (t^+).

Исследователями, занимающимися изучением геокриологических условий арктических территорий, отмечается постепенное отступление границы криолитозоны в северном направлении. Наблюдения на стационарных геокриологических станциях с 1980-х гг. фиксируют повсеместное повышение температуры пород у подошвы деятельного слоя, сокращение мощности ММП как по разрезу, так и по площади, увеличение площади таликов и переход их из категории несквозных в сквозные. Одновременно изменяется длительность периодов протаивания и промерзания. Эти процессы способствуют удлинению периода инфильтрационного питания при незначительном сокращении годовой суммы атмосферных осадков. В результате деградации ММП отмечается повышение уровней грунтовых вод и увеличение подземного стока [2, 3].

Климатические изменения подтверждаются данными метеостанций (Ямал, Диксон, Тикси). Выделение двух климатических периодов (условно до и после 1980-х гг.) обосновано методом накопленных сумм (CUSUM [8]) к временным рядам среднегодовых температур и сумм атмосферных осадков. Выявленные точки смены режима (например, для Тикси – 1987 г. для Ямала – 1984–1986 гг.) интерпретируются как региональный отклик на глобальный климатический сдвиг конца 1980-х годов [9]. Для расчетов по уравнениям (1) и (2) использованы данные современного климатического периода (условно после 1980-х гг.).

Осадки. В Арктике сеть гидрометеорологических станций разрежена, а погрешности измерений осадков могут достигать 30–50 % из-за недоулавливания твердых осадков стандартными дождемерами в условиях сильных ветров. Для коррекции применяются эмпирические коэффициенты, однако их надежность в арктических условиях ограничена. В связи с этим предпочтение отдано математическим моделям климата или комбинированным наборам данных, которые позволяют получить пространственное распределение осадков. В качестве исходных моделей/наборов данных рассматривались ERA5, CRU TS, TerraClimate, CHELSA, которые сопоставлялись с фактическими наблюдениями на метеостанциях, соответствующими выделенному современному климатическому периоду.

В качестве примера рассмотрена территория п-ова Ямал, где фактические данные метеостанций за современный климатический период 1985–2023 гг. (рисунок) были сопоставлены с данными модели CHELSA. Расхождения между измеренными и модельными значениями температуры не превысили 1 °C. Однако анализ рядов осадков выявил пропуски примерно в 25 % наблюдений. Поскольку годовая сумма осадков является интегральной характеристикой, отсутствие части данных неизбежно ведет к систематическому занижению суммарных показателей. Сравнение подтвердило эту закономерность: значения по станциям оказались на 20–30 % ниже модельных оценок CHELSA.

Коэффициент подземного стока. На исследуемых территориях отсутствуют режимные гидропосты, что исключает прямую оценку коэффициента подземного стока, поэтому величина интерполирована по материалам предшественников (северо-западная часть п-ова Таймыр) [4–6 и др.] или рассчитана по гидропостам-аналогам (Тикси, Ямал) с близкими гидрологическими и геокриологическими условиями, по возможности охватывающими разные типы водосборов (малые и крупные, равнинные и горные). Расчет выполнен по формуле (2) для современного климатического периода, а подземный сток приравнен к

среднегодовому многолетнему меженному зимнему подземному стоку в реки, приведенному к 90%-ной обеспеченности.

Выбор наиболее жесткого критерия обеспеченности обусловлен целевой задачей – построением карты прогнозных ресурсов подземных вод категории Р₃. Такой подход позволяет уменьшить региональный ущерб речному стоку и обеспечить расчетную величину ресурсов подземных вод в течение всего года.

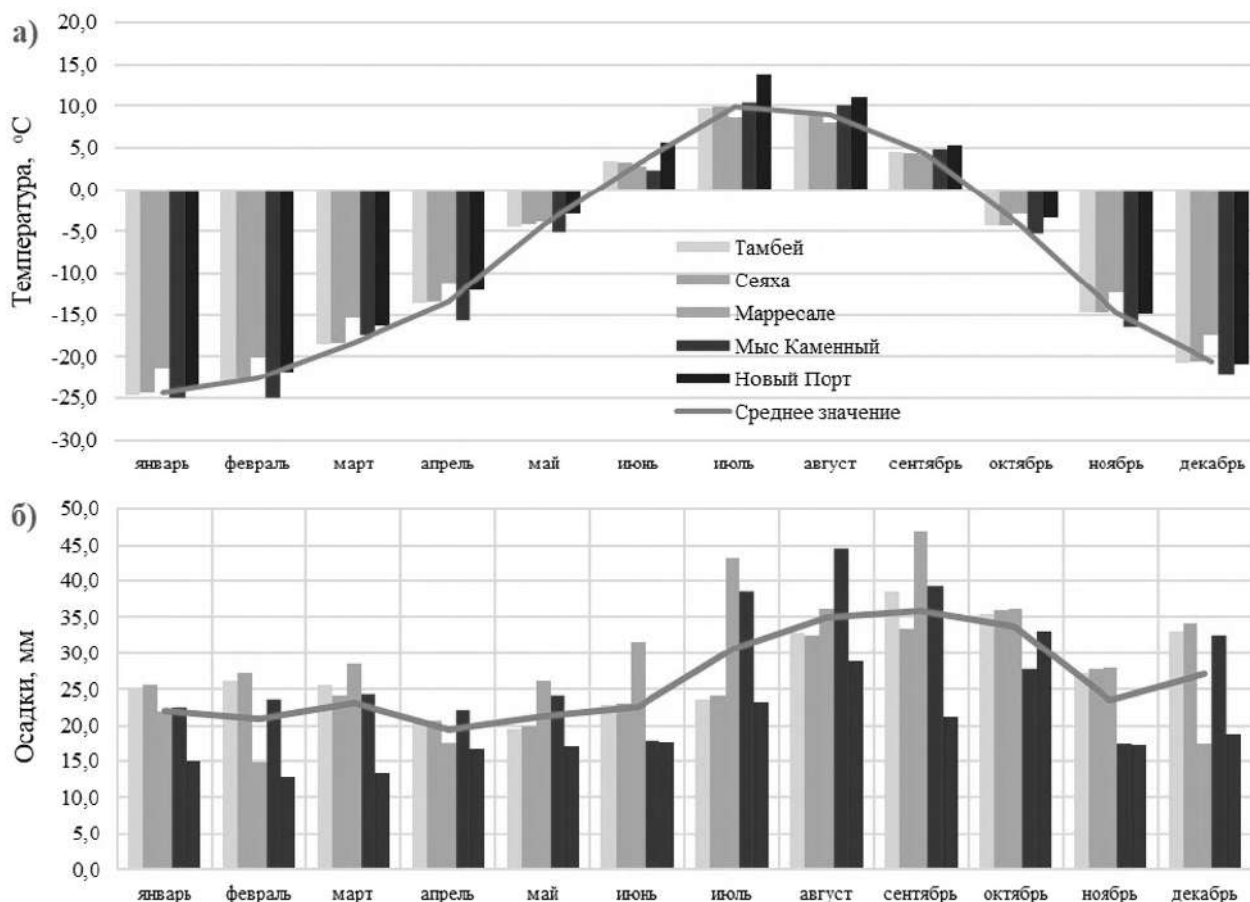


График годового хода температур (а) и осадков (б) за период 1985–2023 гг. по данным метеостанций на территории полуострова Ямал.

С учетом сходства условий формирования вод сквозных и несквозных таликов в течение года для них в пределах одного водосбора принимается единый коэффициент подземного стока. Для вод сезонноталого слоя, формирующихся лишь в период положительных температур, коэффициент корректируется с учетом продолжительности оттаивания (3):

$$\lambda_{\text{стс}} = \frac{t^+}{365} \lambda_{\text{талик}} \quad (3)$$

Таким образом, оценка подземного стока надмерзлотных вод и вод таликов для водосбора площадью S сводится к решению уравнения (4):

$$\lambda_{\text{общ}} O_{\text{ср}} S_{\text{общ}} = \lambda_{\text{талик}} \sum O_{\text{талик}} S_{\text{талик}} + \frac{t^+}{365} \lambda_{\text{талик}} \sum O_{\text{стс}} S_{\text{стс}} \quad (4)$$

Количественная оценка подземного стока для исследуемых территорий представлена в таблице. Для территории северо-западной части Таймыра (Диксон) приведены обобщенные значения подземного стока и его коэффициента без дифференциации по типам вод, 90%-ная

обеспеченность значений рассчитана при коэффициенте вариации $C_v=0.35$ и коэффициенте асимметрии $C_s=2C_v$ [1].

На основе полученных результатов выявлены основные закономерности формирования подземного стока:

Количественная оценка подземного стока на исследуемых территориях

Исследуемая территория	Площадь, тыс. км ²	Осадки, мм (исходные данные)	Коэффициент подземного стока 90 % обеспеченности (исходные данные)		Подземный сток 90 % обеспеченности, тыс. м ³ /сут	
			СТС	талики	СТС	талики
Ямал	90.66	354–808 (CHELSA)	>0.01–0.06	0.01–0.17	3470	4055
			(водосборные бассейны-аналоги)			
Тикси	90.63	255–436 (TerraClimate)	>0.01–0.03	>0.01–0.09	344	225
			(водосборные бассейны и их аналоги)			
северо-западная часть Таймыра (Диксон)	21.61	268–385 (интерполяция данных метеостанций)	0.02–0.03 (интерполяция данных предшественников [4–6 и др.])		515	

1. Ресурсы подземных вод в арктических регионах сосредоточены преимущественно в четвертичных образованиях, однако их объемы ограничены и локализованы в зонах таликов и сезонно-талом слое. Использование вод сезонноталого слоя в практических целях маловероятно из-за их кратковременности существования.

2. Режим, питание и циркуляция надмерзлотных вод и вод сквозных таликов в значительной степени определяются криогенным фактором: распространением, мощностью и льдистостью ММП, а также геоморфологическими и климатическими условиями.

3. Слабая гидрогеологическая изученность арктических территорий требует периодического уточнения оценок подземного стока с учетом их высокой динамичности, обусловленной как природными (климатическими), так и техногенными факторами [1]. Актуализация оценок должна базироваться на режимных наблюдениях за уровнями, расходом и качеством вод на гидропостах и в скважинах.

Список литературы

1. Гавич И.К., Лучшева А.А., Семенова-Ерофеева С.М. Сборник задач по общей гидрогеологии: Учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1985. 412 с.
2. Гриневский С.О., Поздняков С.П. Ретроспективный анализ влияния климатических изменений на формирование ресурсов подземных вод // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2017. № 2. С. 42–50.
3. Джамалов Р.Г., Зекцер И.С., Кричевец Г.Н. и др. Изменение подземного стока под влиянием климата и антропогенных воздействий // Водные ресурсы. 2008. Т. 35, № 1. С. 17–24.
4. Карта естественных ресурсов подземных вод СССР (подземного стока зоны интенсивного водообмена): масштаб 1:7 500 000 // Атлас гидрогеологических и инженерно-геологических карт СССР. М.: ВСЕГИНГЕО, 1983.
5. Лукьянчикова Л.Г., Лункин Д.И., Сафронова И.Ф. и др. Геологический отчет по Государственному контракту № 134 от 30.06.2015 г. «Поиски подземных вод для обеспечения водоснабжения пгт. Диксон Красноярского края». 2017. Росгеолфонд № 529026.
6. Ресурсы поверхностных вод СССР. 16. Ангара-Енисейский район. Вып. 1. Енисей. Л.: «Гидрометеиздат», 1973. 723 с.
7. Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны. – М.: Изд-во МГУ, 1983. 231 с.
8. Page E.S. Continuous inspection schemes // Biometrika. 1954. Vol. 41, № 1-2. P. 100–115.
9. Reid P.C., Hari R.E., Beaugrand G. et al. Global impacts of the 1980s regime shift // Global Chang Biol. 2016. Vol. 22, № 2. P. 682–703.

ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОД НА УЧАСТКЕ ЕНИСЕЙСКИЙ ПО ДАННЫМ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАБОТ

Неуважаев Г.Д., Петрова Д.В., Озерский Д.А., Смирнов К.Д., Блохин П.А., Расторгуев А.В.
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва,
neuvazhaev@ibrae.ac.ru

Аннотация. В работе обобщены результаты опытно - фильтрационных работ (ОФР) в наклонных скважинах на участке Енисейском Нижнеканского массива. Показано, что переход на герметичные пакерные системы и учет скважинной емкости при интерпретации снижают ранее завышенные оценки водопроводимости. Обработка восстановлений уровня в скважинах с использованием решений Dougherty–Babu, Moench и Barker–Black указывает на двупористый характер массива и эффективную водопроводимость порядка 0.15–0.18 м²/сут при существенной вариабельности емкости.

Ключевые слова: *опытно-фильтрационные работы, трещиноватые породы, участок Енисейский, водопроводимость, двупористая среда*

Abstract. This paper summarizes results of hydraulic testing in fractured crystalline rocks at the Yeniseisky site (Nizhnekansk massif) based on interval tests. Improved packer systems and explicit accounting for wellbore storage and skin effects reduce bias in transmissivity estimates compared with earlier interpretations. Recovery data were analyzed in AQTESOLV using fractured-rock and double-porosity solutions (Dougherty–Babu; Moench; Barker–Black). The response is consistent with a conductive fracture network embedded in a high-storage matrix, yielding an effective transmissivity of approximately 0.15–0.18 m²/day.

Keywords: *hydraulic testing, fractured rock, Yeniseisky site, transmissivity, double porosity*

Долговременная безопасность пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов на участке Енисейском во многом определяется фильтрационными свойствами трещиноватых кристаллических пород [1]. На ранних этапах работ водопроводимость оценивалась по одиночным ОФР, однако недостаточная герметичность пакеров и подтеки по обсадной колонне приводили к систематическому завышению параметров. Цель работы – представить уточненные оценки проводимости массива по данным ОФР и показать влияние учета скважинных эффектов и выбора аналитической модели.

Массив в целом слабопроницаем: большинство поинтервальных оценок коэффициента фильтрации в коренных породах лежит в диапазоне 10⁻⁴–10⁻³ м/сут, а повышенная проводимость приурочена к отдельным трещинным и трещинно-жильным зонам верхней части разреза. Отсутствие выдержанных водоупоров и малые радиусы влияния приводят к тому, что одиночные ОФР преимущественно характеризуют приствольную зону и локальные проводящие элементы.

Испытания выполнялись в изолированных интервалах наклонных скважин С–1 и С–5 с использованием однопакерной компоновки и расходомера малых дебитов. Изолированность интервала подтверждалась контролем давления в нескольких зонах. Схема применяемой компоновки испытаний и состава оборудования приведена на рисунке. Серии «экспресс-откачек» и восстановлений уровня рассматривались как самостоятельные опыты,

Интерпретация выполнялась в программном комплексе AQTESOLV с использованием решений для трещиноватых и двупористых сред, включая Dougherty – Babu [6] и Moench [2] (двойная пористость) и Barker – Black [5]. В расчетах учитывались скважинная емкость и скин-эффект, определяющие ранний участок кривых восстановления, игнорирование этих факторов может приводить к завышению фильтрационных характеристик. Необходимость такого учета подтверждается мировой практикой гидрогеологических опытов в кристаллических массивах [3, 7, 8].

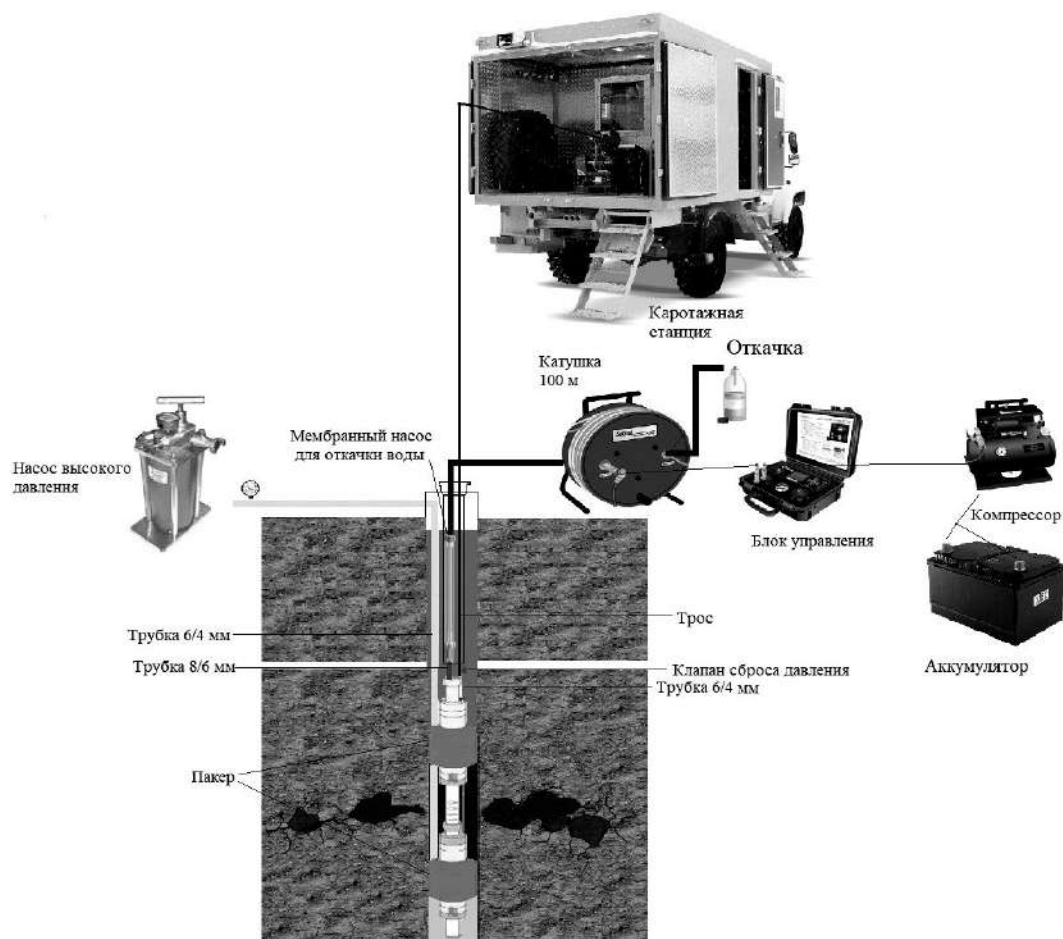


Схема компоновки установки для проведения ОФР в изолированном интервале.

Сопоставление обработок показало, что оценки водопроницаемости зависят от выбранной модели, однако порядок величины для «эффективной» водопроницаемости массива устойчиво находится на уровне десятых долей $\text{м}^2/\text{сут}$ (таблица). Для части интервалов в скважине С-1 решения типа Dougherty – Babu дают более высокие значения T , отражающие ранний отклик хорошо проводящей трещинной подсистемы, поздняя стадия восстановления и результаты для полного вскрытия ствола лучше согласуются с порядком $T \approx 0.15\text{--}0.18 \text{ м}^2/\text{сут}$. Коэффициент водоотдачи изменяется значительно, что соответствует двупористой постановке с емкой матрицей и проводящими трещинами.

Результаты интерпретации ОФР (обобщенные оценки)

Испытание	Модель	Ключевой результат
С – 1, интервалы 0–30 / 0–48 / 0–68 м	Dougherty–Babu	$T = 1.3\text{--}1.7 \text{ м}^2/\text{сут}$ (ранний отклик); чувствительно к S_w и скин-эффект.
С – 1, 1–100 м	Barker–Black	$T \approx 0.178 \text{ м}^2/\text{сут}$; позднее восстановление описывается хуже на конце кривой.
С – 5, весь ствол	Barker–Black	$T \approx 0.178 \text{ м}^2/\text{сут}$; S выше, что отражает емкостную роль матрицы.

Полученные оценки указывают на выраженную неоднородность и возможную анизотропию трещинной проницаемости, что ограничивает перенос результатов одиночных ОФР на масштабы расчетных моделей. Для дальнейшей калибровки дискретно – трещинных (DFN) моделей и снижения неопределенности рекомендуется дополнить программу ОФР интерференционными и трассерными тестами [4, 8].

1) модернизация пакерного оборудования и контроль перетоков позволяют устранить систематическое завышение фильтрационных параметров; 2) интерпретация с учетом скважинных эффектов и аналитических моделей двойной пористости дает эффективную водопроницаемость порядка 0.15–0.18 м²/сут; 3) для масштабирования параметров на уровень расчетных моделей требуется расширение экспериментальной базы: проведение серии дополнительных испытаний, включая кросс-скважинные (интерференционные) тесты и миграционные (трассерные) опыты, позволяющие оценить наличие проводящих путей по трещинам и параметры переноса на характерных для модели масштабах.

Список литературы

1. Озерский А.Ю., Караулов В.А. Гидрогеологические исследования при изысканиях для подземного строительства в пределах массива кристаллических пород в южной части Енисейского края // Инженерные изыскания. 2012. № 11. С. 52–59.
2. Barker J.A., Black J.H. Slug tests in fissured aquifers // Water Resources Research. 1983. Vol. 19, No. 6. P. 1558–1564. DOI: 10.1029/WR019i006p01558.
3. Dougherty D.E., Babu D.K. Flow to a partially penetrating well in a double-porosity reservoir // Water Resources Research. 1984. Vol. 20, No. 8. P. 1116–1122. DOI: 10.1029/WR020i008p01116.
4. Hsieh P.A. A brief survey of hydraulic tests in fractured rocks // Dynamics of Fluids in Fractured Rock / Eds. B. Faybishenko, P.A. Witherspoon, S.M. Benson. Washington, DC: AGU, 2000. P. 59–66.
5. Ludvigson J.-E., Hansson K., Hjerne C. Forsmark site investigation. Method evaluation of a single-hole hydraulic injection tests at site investigations in Forsmark. Stockholm: SKB, 2007. 162 p. (SKB Report P – 07 – 80).
6. Moench A.F. Double-Porosity Models for a Fissured Groundwater Reservoir with Fracture Skin // Water Resources Research. 1984. Vol. 20(7). P. 831–846.
7. Shahbazi A., Saeidi A., Chesnaux R. A review of existing methods used to evaluate the hydraulic conductivity of a fractured rock mass // Engineering Geology. 2020. Vol. 265. 105438.
8. Zhang J., Wang J., Ji R. et al. In-situ interference and tracer tests in granite rock with fractures at Beishan exploration tunnel, China // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2025. Vol. 192. 106166.

ОСОБЕННОСТИ ВЕРХНЕГО ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЯСА В МАССИВЕ АРХЕЙСКИХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОД НА ЕНИСЕЙСКОМ КРЯЖЕ

Озерский А.Ю.^{1,2}, Пушкарева О.В.¹, Караулов В.А.¹, Панов Е.А.¹

¹АО «Красноярскгеология», Красноярск, pov@krasgeo.ru

²Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Аннотация. Рассматриваются гидрогеодинамические условия верхней части массива кристаллических архейских пород, выбранного для строительства пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов. В массиве преобладают слабопроницаемые и проницаемые зоны трещиноватости с коэффициентами фильтрации от 0.01 до 1.58 м/сут, водопроницаемостью от 0.05 до 18.80 м²/сут и уровнепроницаемостью от 1,8·10³ до 3,6·10⁶ м²/сут. Движение подземных вод происходит под уклоном 0.01.

Ключевые слова. гидрогеодинамика, поясность, коэффициент фильтрации, Енисейский кряж

Abstract. The hydrogeodynamic conditions of the upper part of a crystalline archaean rock massif designated for radioactive waste disposal are examined. Slightly permeable and permeable fracture zones dominate in the rock massif. Fracture zones are characterized with hydraulic conductivity ranging from 0.01 to 1.58 m/day, transmissivity from 0.05 to 18.8 m²/day, and hydraulic diffusivity from 1.8·10³ to 3.6·10⁶ m²/day. Hydraulic gradient is about 0.01.

Keywords. hydrogeodynamics, zonality, hydraulic conductivity, Yeniseisky Ridge

Систематическое геологическое изучение массива архейских кристаллических пород с целью захоронения в нем радиоактивных отходов (РАО) было начато на исходе первого десятилетия текущего века. Изучаемый массив находится в юго-западной части Ангаро-Канского террейна Енисейского кряжа, в 60 км северо-восточнее Красноярска, в пределах территории закрытого административно-территориального образования г. Железногорска. Породы массива сложены раннеархейскими гнейсами, прорванными дайками долеритов, предположительно рифейского возраста [8].

К 2016 г. на участке недр, получившем название «Енисейский», были завершены поисковая и оценочная стадии геологоразведочных работ, в результате которых ГКЗ Роснедра признала участок потенциально пригодным для опытного захоронения РАО в целевом интервале глубин 450–525 м. В 2016 г. по проекту строительства подземного сооружения было получено положительное заключение Главного управления государственной экспертизы. В наши дни ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» («НО РАО») ведет на участке строительство подземной исследовательской лаборатории.

Особое место при получении положительной оценки результатов работ Роснедрами принадлежало гидрогеологическим исследованиям, так как действующие федеральные нормы и правила оценки безопасности при захоронении РАО в глубокие геологические формации устанавливают специальные принципы, критерии оценки и требования к гидрогеологическим условиям объекта [4]. На поисковой и оценочной стадиях геологического изучения недр участка Енисейского основное внимание уделялось глубинной части породного массива, охарактеризованной 229 интервальными откачками, 8 кустовыми откачками и 241 анализом химического состава подземных вод. Опытными-фильтрационными работами показали, что в пределах всего участка от его поверхности до изученной глубины 700 м преобладающими являются водонепроницаемые породы с коэффициентом фильтрации до 0.005 м/сут [2], при этом около 70 % всех значений коэффициента фильтрации принадлежит интервалу значений от 0.0001 до 0.001 м/сут.

В результате была разработана и обоснована гидрогеологическая стратификация массива и выявлены основные закономерности изменения гидрогеологических условий по вертикали. Применительно к гидрогеологическим массивам трещинных вод для характеристики вертикальных закономерных изменений вместо термина «зональность» используется термин «поясность», так как наблюдаемые изменения происходят не с глубиной, а с высотой массива [6].

На поисковой и оценочной стадиях работ было выявлено, что в недрах Енисейского участка, как и в других гидрогеологических массивах, вертикальное распределение

проницаемости пород подчиняется вертикальной поясности, зависящей от гипсометрического положения базисов дренирования. Соответственно гипсометрическим отметкам местного, регионального и глобального базисов дренирования были выделены четыре пояса, при этом в двух нижних поясах обнаружены только водонепроницаемые породы с медианами коэффициентов фильтрации 0.0004–0.0005 м/сут. В условиях массива коэффициент фильтрации характеризуется логнормальным распределением, поэтому медиана более объективно отображает фоновые значения этого показателя. Водопроницаемые породы с коэффициентом фильтрации более 0.005 м/сут в редких случаях обнаруживаются в двух верхних поясах выше горизонта с абсолютной отметкой +150 м, то есть выше регионального базиса дренирования – русла р. Енисея (+120 м) [3, 5].

В 2023 г., после почти десятилетнего перерыва, было возобновлено геологическое изучение недр Енисейского участка, целью которого является выполнение стадии геологической разведки и государственная экспертиза геологических данных для оценки пригодности участка для глубинной изоляции РАО. В 2023–2024 гг. геологическая разведка была начата с изучения верхней части массива до глубины 150 м, где располагается зона приповерхностной региональной трещиноватости, которая на начальных стадиях работ была изучена преимущественно геофизическими методами, практически без изучения вещественного состава и проницаемости коренных пород. Изучение приповерхностной зоны массива горных пород участка Енисейского призвано решить целый ряд задач, связанных с обеспечением долговременной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов. Кроме решения задачи дополнительного геолого-структурного картирования участка, важно изучение геомеханической прочности верхней части массива, ее роли в формировании подземных вод и в питании ими глубинных частей массива, а также массопереноса природных и техногенных веществ. В настоящей статье рассматриваются результаты работ 2023–2024 гг.

Объектом исследований является верхняя часть зоны экзогенной трещиноватости гидрогеологического массива архейских кристаллических пород. На начальном этапе разведки в 2023 г. были пробурены 10 скважин глубиной около 150 м, а в 2024 г. – 21 гидрогеологическая скважина глубиной от 25.6 до 61.6 м на самую верхнюю часть коренных пород и покровные отложения.

Всего было проведено 27 одиночных и 9 кустовых откачек. Для обработки результатов откачек использовалась программа ANSDIMAT [7], облегчающая выполнение и отображение результатов расчетов. При обработке откачек была принята схема неограниченного безнапорного водоносного горизонта в трещиноватых породах, имеющего свободную поверхность. При расположении водоносной зоны трещиноватости скальных пород ниже покровных глинистых пород условия принимались напорными. По программе ANSDIMAT были вычислены значения водопроводимости, а коэффициент фильтрации был определен исходя из мощности трещинных водоносных зон, выделенных по данным гидрокаротажа, поэтому рассчитанный коэффициент фильтрации (Кф) не может считаться точным, хотя он используется нами как классификационный показатель проницаемости пород согласно ГОСТ 25100–2020 [2]. Полученные значения коэффициента фильтрации могут быть использованы для расчетов водоприток в горную выработку, но для миграционных расчетов они не рекомендуются, тем более что пьезопроводность водоносных зон остается весьма слабоизученной.

Геолого-гидрогеологические исследования говорят о наличии в верхнем гидродинамическом поясе Енисейского участка гетерогенной среды трещиновато-блокового типа, сложенной породами, разбитыми относительно крупными трещинами на блоки, которые, в свою очередь, имеют примерно однородную трещиноватость, формирующую фон коллекторского пространства породного массива. При этом расположение проницаемых и водообильных зон далеко не всегда совпадает с зонами дизъюнктивных нарушений. В свою очередь, протяженные тектонические зоны не гарантируют вскрытие в их пределах водообильных пород.

Относительно редкая сеть крупных трещин, наличие блоков практически водонепроницаемых пород при весьма контрастном рельефе не позволяют рассматривать геофильтрационное поле верхней части участка как сплошную среду [1]. Вместе с тем установлена гидравлическая связь отдельных водоносных трещинных зон, проявляющаяся в латеральном движении подземных вод от областей питания к областям разгрузки.

В отличие от глубинной части массива, где преобладают водонепроницаемые породы с коэффициентом фильтрации менее 0.005 м/сут, в верхнем поясе массива до изученной глубины 150 м преобладают проницаемые зоны трещиноватости. Наиболее широко (60 % опытов) распространены слабоводопроницаемые зоны трещиноватости, а в одной трети опытов обнаружены водопроницаемые зоны трещиноватости. Водонепроницаемые зоны выявлены всего в двух опытных откачках (7 %) (таблица).

Показатели распределения гидрогеологических параметров зон трещиноватости

Показатель	Глубина кровли, м	Мощность, м	Статический уровень, м	Удельный дебит, л/см	Водопроницаемость, м ² /сут	Коэффициент фильтрации, м/сут
Водонепроницаемая зона трещиноватости ($K_f < 0.005$ м/сут). N=2						
Медиана	26.4	13.6	14.3	0.006	0.105	0.004
Минимум	12.8	10.0	8.12	0.005	0.06	0.003
Максимум	40	17.2	20.48	0.007	0.15	0.005
Слабоводопроницаемая зона трещиноватости ($0.3 > K_f > 0.005$ м/сут). N=16						
Медиана	18.7	24.2	13.1	0.0	1.9	0.09
Минимум	9.26	2.0	1.86	0.006	0.05	0.01
Максимум	40	44.64	24.99	0.122	8.73	0.29
Водопроницаемая зона трещиноватости ($K_f > 0.3$ м/сут). N=9						
Медиана	19.8	20.0	10.1	0.1	11.1	0.51
Минимум	7.7	7.0	1.3	0.02	6.08	0.35
Максимум	40	29.9	19.79	0.114	18.8	1.58

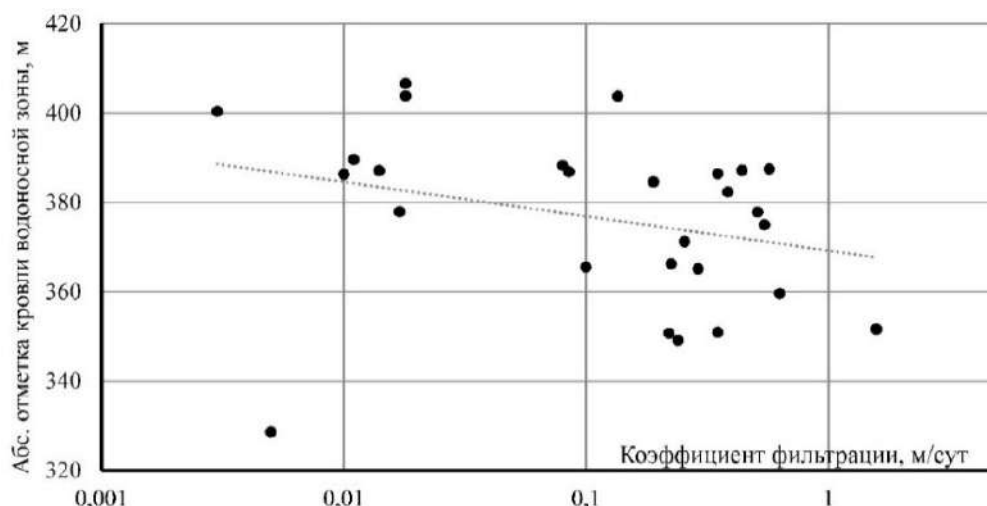
При существенных различиях в проницаемости все три разновидности зон трещиноватости характеризуются довольно близкими условиями залегания: мощностью, глубиной, статическим уровнем (таблица).

Уровнепроводность была определена по результатам девяти кустовых откачек из водопроницаемых зон трещиноватости. Этот показатель характеризуется высокой неоднородностью и изменяется от $1.8 \cdot 10^3$ до $3.6 \cdot 10^6$ м²/сут, причем максимальные его значения проявляются в зонах с наиболее высокой водопроницаемостью.

Латеральная изменчивость фильтрационных параметров проявляется в зоне их наиболее высоких значений в северной части участка. Значения коэффициентов фильтрации и водопроницаемости здесь в два раза, а уровнепроводности – на два порядка выше, чем на востоке и в центральной части территории.

Движение подземных вод полностью контролируется рельефом, оно направлено от водоразделов к долинам ручьев. Уклоны потока подземных вод примерно равны 0.01, что выше уклонов в более глубинных поясах массива, где они изменяются от 0.02–0.04 к долине речки Шумиха до 0.05–0.07 в сторону долины Енисея.

В отличие от глубинной части массива, где поясность уверенно идентифицируется в зависимости от высоты базисов дренирования [5], в верхнем поясе массива, расположенном гипсометрически выше местного базиса (р. Шумиха), никакой зависимости коэффициента фильтрации от абсолютных отметок не наблюдается (рисунок).



Коэффициенты фильтрации водоносных зон трещиноватости в зависимости от абсолютных отметок кровли этих зон.

В распределении коэффициентов фильтрации наблюдаются две дифференцированные группы значений: менее 0.05 м/сут и более 0.05 м/сут, что говорит о бимодальном распределении этого параметра. При этом наблюдается слабовыраженная тенденция роста коэффициента фильтрации по мере снижения абсолютной отметки положения водоносных пород. Это объясняется тем, что наиболее обводненные зоны трещиноватости были вскрыты скважинами в эрозионных врезках (долинах водотоков), расположенных гипсометрически ниже водоразделов, образованных монолитными породами меньшей проницаемости.

В верхнем гидродинамическом поясе архейских кристаллических пород на Енисейском участке преобладает слабоводопроницаемая зона трещиноватости, залегающая на глубинах от 7.7 до 40 м, со средней мощностью 21 м. Для верхнего пояса в целом выявлены медианные значения коэффициента фильтрации – 0.22 м/сут, водопроницаемости – 5.45 м²/сут. Почти в половине опытов наблюдались безнапорные условия, в трети – субнапорные с напором до 10 м, реже отмечен напор, достигавший 30 м. Наблюдаемые условия обеспечивают питание более глубоких частей кристаллического массива и целевого интервала захоронения РАО.

На участке продолжаются гидрогеологические исследования, одной из важнейших задач которых мы считаем повышение достоверности гидрогеологических параметров.

Список литературы

1. Боровский Б.В., Хордикайнен М.А., Язвин Л.С. Разведка и оценка эксплуатационных запасов месторождений подземных вод в трещинно-карстовых пластах. М.: Недра, 1976. 247 с.
2. ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация. Издание официальное. М.: Стандартинформ, 2020, 38 с.
3. Захоронение РАО на участке Енисейский в Красноярском крае: история выбора площадки и современное состояние исследований. М.: Наука, 2024. 368 с. DOI: 10.7868/9785020411067.
4. НП-055-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности. М.: Ростехнадзор, 2014. 54 с.
5. Озерский А.Ю., Караулов В.А. Гидрогеологические исследования при изысканиях для подземного строительства в пределах массива кристаллических пород в южной части Енисейского кряжа // Инженерные изыскания. 2012. № 11. С. 52–59.
6. Пиннекер Е.В. Проблемы региональной гидрогеологии. М.: Наука, 1977. 196 с..
7. Синдаловский Л.Н. Аналитическое моделирование опытных опробований водоносных пластов и скважинных водозаборов (программный комплекс ANSDIMAT). СПб.: Наука, 2014. 516 с.
8. Эволюция южной части Сибирского кратона в докембрии / Науч. ред Е.В. Складов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 367 с.

РЕГИОНАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОДЗЕМНОГО СТОКА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ ПО ДАННЫМ КОНЦА XX–НАЧАЛА XXI ВЕКА

Поздняков С.П.¹, Гриневский С.О.¹, Самарцев В.Н.¹, Лехов В.А.¹, Ван Пин²

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, sppozd@mail.ru

²Институт географических наук и природных ресурсов Китайской академии наук

Аннотация. На основе анализа стоковых данных по 490 индивидуальным водосборам и высоко разрешимых баз данных метеорологической информации построена серия согласованных карт, характеризующих среднесуточные компоненты водного баланса за 1980–2024 гг. годы на территории Московского (МAB) и сопредельных (САБ) артезианских бассейнов. Эта серия включает карты испарения и эффективных осадков, формирующих речной сток, и карту подземного стока. Полученная карта подземного стока качественно согласуется с картой подземного стока СССР 1982 г., но обладает более высокой детальностью и показывает увеличение в среднем подземного стока на европейской части России в конце XX – начале XXI века по сравнению с периодом 50–70-х годов прошлого столетия, по данным которых были выполнены обобщения по подземному стоку СССР.

Ключевые слова: речной сток, суммарное испарение, расчленение гидрографа, водосборный бассейн, подземный сток

Abstract. Based on the analysis of runoff data from 490 individual catchments and high-resolution meteorological databases, a series of consistent maps characterizing the long-term average components of the water balance for the period 1980–2024 within the Moscow (MAB) and adjacent (SAB) artesian basins has been constructed. This series includes a map of evaporation, a map of effective precipitation forming river runoff, and a map of groundwater runoff. The resulting groundwater runoff map is qualitatively consistent with the 1982 USSR groundwater runoff map but provides higher detail and shows an average increase in groundwater runoff in the European part of Russia in the late 20th and early 21st centuries compared to the period of the 1950s–1970s, which served as the basis for the USSR groundwater runoff generalizations.

Keywords: river runoff, total evaporation, hydrograph separation, catchment basin, groundwater runoff.

Проблема пространственной изменчивости формирования инфильтрационного водообмена является одной из фундаментальных нерешенных междисциплинарных задач гидрогеологии и гидрологии. Для европейской части РФ последнее крупное научное обобщение пространственного распределения естественных ресурсов подземных вод, представленное в виде карты подземного стока Центральной и Восточной Европы масштаба 1:5000 000, было выполнено на рубеже 70–80-х годов прошлого века [1] с применением гидролого–гидрогеологического метода [2]. Для создания этой карты использовались стоковые данные, полученные до начала заметных климатических изменений. Эта карта до сих пор служит основой для различных региональных водно–балансовых оценок, в том числе для оценки ресурсного потенциала территории РФ [3]. Однако обобщение данных наблюдений за стоком показывает, что для территории европейской части РФ с середины 70-х годов идут изменения ранее стационарных стоковых рядов [4, 5]. Эти изменения включают и тенденцию к увеличению минимального зимнего стока, ассоциируемого обычно с подземным питанием рек [4].

Для анализа формирования водного баланса и подземного стока территории МAB и САБ использовались стоковые данные по более чем 450 частным водосборам за 1980–2024 г. и высокоразрешимые базы данных метеорологической информации – осадков, потенциального испарения и суммарного испарения. В качестве базы данных осадков и потенциального испарения выбрана база данных CHELSA [6], а для суммарного испарения использовались данные проекта MOD16 [7]. Выбор этих баз данных метеорологических характеристик обусловлен тем, что именно они в наилучшей степени удовлетворяют уравнению среднесуточного водного баланса в период конца XX – начала XXI века. Для анализа среднесуточного водного баланса использовалась модификация водно–энергетического подхода М.И. Будыко, в которой связь стока, осадков и испарения описывается уравнением Фу [8]. Для балансово–замкнутого бассейна стока среднесуточный сток осадков P тратится на общий сток R и суммарное испарение ET . Слой

суммарного испарения согласно водно-энергетической концепции зависит от доступности влаги, от слоя осадков и потенциальной испаряемости PET .

$$R = P - ET(PET, P) \quad (1)$$

С учетом уравнения (1) уравнение Фу записывается в явном виде относительно слоя стока как:

$$R = P[1 + (PET / P)^\omega]^{(1/\omega)} - PET \quad (2)$$

где ω – эмпирический ландшафтный параметр.

В уравнениях (1–2) слой суммарного стока эквивалентен слою эффективных осадков, формирующих сток, то есть той части осадков, которая не потрачена на суммарное испарение.

Поиск пространственного распределения ландшафтного параметра ω в уравнении Фу осуществлялся путем минимизации отклонения вычисленного стока по этому уравнению по каждому из бассейнов от его оцененной по наблюдаемым стоковым данным величины. Для оценки подземного стока проводилось расчленение гидрографов с выделением подземного стока в реку. По каждому из бассейнов по результатам расчленения вычислялся коэффициент подземного стока r , равный отношению среднесноголетнего слоя подземного стока к среднесноголетнему слою общего стока. Для построения карт проводилась кригинг-интерполяция точечных оценок ω и r на всю исследуемую территорию.

Построена серия согласованных карт, характеризующих компоненты среднесноголетнего водного баланса за 1980–2024 гг. для МАБ и САБ. Высокорастворимая карта среднесноголетних осадков P из базы CHELSA была с использованием карты потенциальной эвапотранспирации PET из этой же базы и карты ландшафтного параметра ω разделена на карты суммарного испарения ET и эффективных осадков, формирующих сток R . Карта эффективных осадков показала согласованность с данными наблюдений за речным стоком по частным бассейнам: ее ошибка (RSME) составила 43 мм, а коэффициент детерминации (R^2) – 0.856. С использованием карты коэффициентов подземного стока r и карты эффективных осадков получена карта подземного стока исследуемой территории. Ее сравнение с оценками по бассейнам дало следующую статистику: RSME = 18 мм, R^2 = 0.765. Сопоставление этой карты с результатами предыдущих работ показывает, что она качественно согласуется с картой подземного стока 1983 г. [1], но обладает более высокой детальностью и показывает в среднем увеличение подземного стока на европейской части России в конце XX – начале XXI века по сравнению с периодом 50–70-х годов прошлого века, по данным для которых были выполнено картирование подземного стока СССР.

Работа выполнена при поддержке, РФФИ, 24–17–00102 и № 25–47–00056.

Список литературы

1. Коноплянец А.А., Всеволожский В.А., Зеккер И.С. и др. Карта подземного стока Центральной и Восточной Европы. Масштаб 1:1 500 000. Л.: ВСЕГЕИ, 1983.
2. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1960. 343 с.
3. Пояснительная записка к карте ресурсного потенциала пресных подземных вод России М 1:5000000. М.: ЗАО “ГИДЭК”, 2013.
4. Самарцев В.Н., Лехов В.А., Гриневский С.О., Григорьев В.Ю., Василенко А.Н., Халеский В.В., Ведяшкина В.В., Поздняков С.П. Связь среднесноголетнего годового стока и климатических характеристик европейской территории России в конце XX – начале XXI в. на основе глобальных баз данных // Вестник МГУ. Сер. 5 География. № 1. 2026.
5. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А. Шевченко А.И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: Обзор публикаций. 1 Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. 49(3):251–269.
6. Karger D.N., Conrad O., Böhrner J. et al. Climatologies at high resolution for the Earth land surface areas // Sci Data. 2017. 4. 170122. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>.
7. Mu Q., Zhao M., Running S.W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm // Rem. Sens. of Env. 2011. Vol. 115, no. 8, p. 1781–1800.
8. Zhang L., Hickel K., Dawes W.R. et al. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration // Water Resour. Res. 2004. Vol. 40, no. 2. 02502. doi:10.1029/2003WR002710.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН ДЛЯ СНИЖЕНИЯ НАПОРОВ В ПРИБОРТОВОМ МАССИВЕ: НАТУРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Хархордин И.Л.¹, Шкиль И.Э.², Хархордина Е.И.¹, Назима В.В.¹
¹ООО "Геостройпроект", Санкт-Петербург, kharkhordin@rambler.ru
²АО "Севералмаз", Архангельск

Аннотация. Проанализирован опыт использования горизонтальных скважин для снижения напоров в падунских отложениях в прибортовом массиве на карьерах тр. Архангельская и тр. им. Карпинского-1. Одной из задач текущих исследований была оценка возможности использования таких скважин при углублении карьера в толщу относительно слабопроницаемых мезенских отложений. Для анализа ситуации на основе постоянно действующей геофильтрационной модели района месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова была разработана прогнозная модель. Расчеты показали, что даже при небольших расходах скважин их влияние на перераспределение напоров в массиве может быть значительным.

Ключевые слова: *постоянно действующая геофильтрационная модель, горизонтальная скважина, дрена, месторождение алмазов*

Abstract. The experience of using horizontal boreholes to reduce water pressure in Padunsky deposits in near Arkhangelskaya and Karpinsky-1 mines was analyzed. One of the objectives of the current research was to assess the feasibility of using such boreholes to deepen the open pits into the relatively low-permeability Mezensky deposits. To analyze the situation, a predictive model was developed based on the permanently supporting groundwater flow model of the M.V. Lomonosov diamond deposit area. Calculations showed that even at low well flow rates, their impact on pressure redistribution within the rock mass can be significant.

Keywords: *permanently supporting groundwater flow model, horizontal borehole, drain, diamond deposit*

Основными задачами при организации дренажа карьерных полей являются обеспечение нормальных условий работы горно-транспортного оборудования, снижение напоров подземных вод в прибортовом массиве для обеспечения устойчивости бортов, предотвращение развития фильтрационных деформаций пород на уступах карьеров (оплывание, суффозия) и обеспечение безопасности ведения горных работ [1, 2].

Горизонтальные скважины, пробуренные из внутрикарьерного пространства, традиционно рассматриваются как один из эффективных методов дренирования прибортового массива. В докладе представлен опыт использования горизонтальных скважин на месторождении алмазов им. М.В. Ломоносова. Месторождение им. М.В. Ломоносова входит в состав Архангельской алмазоносной провинции и расположено вблизи восточного побережья Белого моря на северо-западе Русской плиты. Оно располагается на территории Архангельской области РФ в центральной части Беломорско-Кулойского плато и приурочено к излучине р. Золотицы в ее верхнем течении. Месторождение расположено в западной части крупной региональной структуры Русской плиты – Мезенской синеклизе. Диапазон стратиграфических подразделений дочетвертичных и четвертичных пород изучен как непосредственно в эксплуатируемых карьерах, так и по керну буровых скважин, а также в выходах на дневную поверхность. Стратифицированные образования залегают на архейско-протерозойском фундаменте, представленном метаморфическими и магматическими породами. Рудные тела, включающие десять кимберлитовых трубок, приурочены к зоне глубинного разлома субмеридионального направления.

В пределах осваиваемой (южной) части месторождения им. М.В. Ломоносова выделяют семь водоносных горизонтов и комплексов: четвертичных отложений (Q), олмуго-окуневских отложений (C2ol-oc), урзугских отложений (C2ur), пород кратерной фации (nD3-C2), пород жерловой фации (iD3-C2), отложений падунской свиты венда (Vpd), отложений мезенской и усть-пинезской свит венда (Vmz-up). Водоносные горизонты в отложениях падунской свиты, имеющей мощность около 180 м и коэффициенты фильтрации 0.8-1.5 м/сут., обеспечивают основной объем водопритоков. Снижение напоров в пределах мезенских и усть-пинезских слоев имеет важное значение для обеспечения устойчивости бортов карьеров.

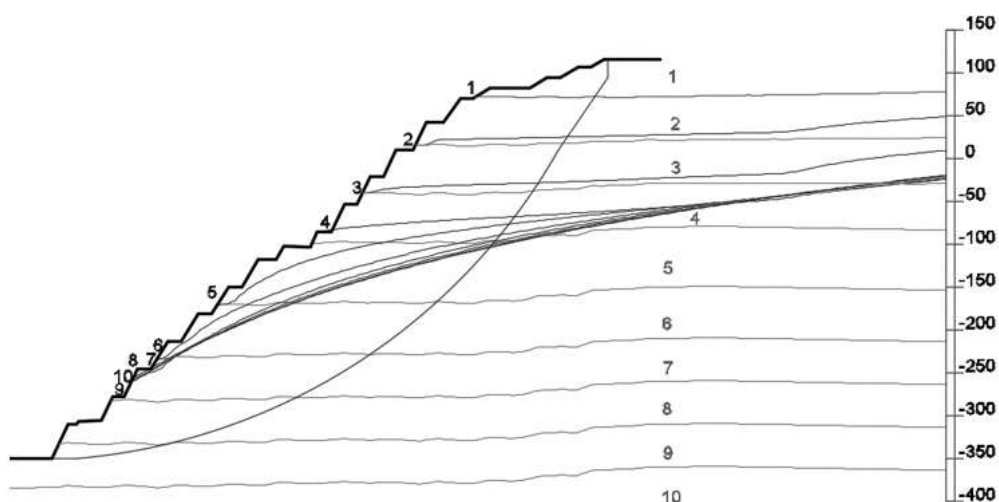
В настоящее время отрабатываются две кимберлитовые трубки: Архангельская и им. Карпинского-1. Дренаживание карьерного поля осуществляется с помощью контура из 75 водопонижающих скважин, оборудованных на падунские отложения и внутрикарьерного водоотлива. Начиная с 2019 г. в приподошвенной части падунских отложений начато оборудование горизонтальных скважин. Всего на карьере тр. Архангельская было пробурено 32 скважины. Скважина ГДС-1 полностью попала в контур горных работ, от скважин ГДС-2,3 остались только небольшие хвостовые части, не оказывающие существенного влияния на дренаживание борта. На карьере тр. им. Карпинского-1 также было пробурено 32 скважины. Часть скважин по мере углубления карьера пересохли. На отдельных скважинах после бурения происходило быстрое снижение расходов из-за сработки упругих и гравитационных запасов подземных вод в массиве.

Оценивая эффективность работы горизонтальных скважин, необходимо отметить, что основная цель их бурения – не получение максимального количества воды, а снятие напоров в бортах с целью снижения нейтральных напряжений и уменьшения их влияния на устойчивость породного массива. Кроме указанной, горизонтальные скважины выполняют дополнительную функцию – они являются наблюдательными скважинами, позволяющими получать информацию для оценки обводненности прибортового массива.

Опыт использования горизонтальных скважин в части разреза, сложенной падунскими отложениями, целесообразен только вблизи подошвы в приконтактной зоне с мезенскими отложениями. В этом случае решается три задачи: а) снижаются напоры в прибортовом массиве в пределах падунской толщи, б) снижаются напоры на кровле комплекса мезенских отложений, в) снижается интенсивность фильтрационных деформаций в приконтактной зоне падунских и мезенских отложений.

Анализ возможности использования горизонтальных скважин для снижения напоров в прибортовом массиве выполнен с использованием прогнозной численной модели, созданной на основе постоянно действующей геофильтрационной модели района месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова. Постоянно действующая модель поддерживается с начала разработки месторождения (2003 г.) и несколько раз перестраивалась в связи с изменениями компьютерной техники, программного обеспечения и круга решаемых и перспективных задач. Актуализация модели выполняется ежеквартально и включает добавление в эпигнозную модель очередного стресс-периода продолжительностью 1 квартал, вынос в модель фактического положения горных работ на конец квартала, задание на скважинах дренажного контура фактических среднесуточных (осредненных по кварталу) расходов откачки, пересчет эпигнозной модели до текущего момента. Для поддержания постоянно действующей модели используются программы MODFLOW [3], PMWIN [4], а также специализированные авторские программные модули. Один из таких модулей предназначен для создания файлов исходных данных для моделирования карьеров и горизонтальных скважин в виде системы дрен.

Региональная геофильтрационная модель, наряду с блочной моделью физико-механических свойств, является частью геомеханической модели месторождения. В области геомеханической модели параметры пространственной дискретизации блочной и геофильтрационной модели совпадают. Для использования результатов расчета напоров с использованием MODFLOW при оценке устойчивости бортов карьеров был разработан специальный программный модуль. На рисунке показана схема использования модельных напоров при расчете устойчивости бортов карьера. Предполагаемая поверхность скольжения пересекает несколько модельных слоев и множество расчетных ячеек. При расчете влияния гидродинамики на устойчивость для каждого расчетного элемента поверхности используется величина напора из соответствующих ячеек геофильтрационной модели.



Расчетные напоры в прибортовом массиве карьера тр. Архангельская (без горизонтальных скважин).

В варианте без горизонтальных скважин перекрывающие отложения и падунские слои либо полностью сдренированы, либо уровни в них остаются вблизи подошвы слоя (первый слой на рисунке соответствует перекрывающим отложениям, 2–4 – падунским). Снижение напоров в них происходит как за счет самого карьера, так и под воздействия контура водопонижающих скважин. Тем не менее в относительно слабопроницаемых мезенских отложениях высокие напоры сохраняются на небольшом расстоянии от борта карьера.

Использование горизонтальных скважин позволяет отодвинуть область высоких напоров от борта карьера в мезенских отложениях. Рассмотренный вариант предполагает оборудование 39 горизонтальных скважин, расположенных на трех уровнях, отвечающих 6, 7 и 9-му модельным слоям.

Выполненные расчеты показали существенную зависимость коэффициентов запаса устойчивости бортов карьера от величины остаточных напоров в пределах мезенских отложений. Расчет оптимального профиля борта с нормативным запасом коэффициента устойчивости (1.3) показал, что использование горизонтальных скважин позволяет снизить объемы вскрышных работ.

Эффективность работы горизонтальной скважины может сильно зависеть от проницаемости локального прослоя, в который попадает ствол скважины. При попадании скважины в относительно слабопроницаемый слой эффективность ее работы по снижению напоров может быть крайне низкой.

Наряду с горизонтальными скважинами, при наличии серий тонких более проницаемых слоев необходимо рассмотреть возможность использования наклонных скважин с углами заложения до 5–7°.

При использовании горизонтальных скважин для снижения напоров в мезенских отложениях не следует ожидать высоких расходов, но с учетом низкой проницаемости водовмещающих пород даже при расходах в доли м³/ч эффект по снижению напоров в прибортовом массиве может быть значимым.

Список литературы

1. Мироненко В.А., Мольский Е.В., Румынин В.Г. Горнопромышленная гидрогеология. М.: Недра, 1989. 287 с.
2. Норватов Ю.А. Изучение и прогноз техногенного режима подземных вод (при освоении месторождений полезных ископаемых). Л.: Недра, 1988. 261 с.
3. Harbaugh A.W. MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model – the ground-water flow process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16. Virginia, 2005. 253 p.
4. Simcore Software, Processing MODFLOW. An Integrated modeling environment for the simulation of groundwater flow, transport and reactive processes, July 5, 2012. 484 p.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЛИТИЯ ИЗ ГИДРОМИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Ханхакшинов И.Н., Зелинская Е.В., Барахтенко В.В., Филатова Е.Г., Монхороева Л.М.,
Толмачева Н.А., Ступин Е.О.

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск,
khankhakshinov_kafedraopi@mail.ru*

Аннотация. В работе описаны возможности по использованию гидроминеральных ресурсов Сибирской платформы Иркутской области как источника для извлечения ценных макрокомпонентов и редких элементов, в первую очередь лития. Изучен химический и фазовый состав проб рассолов в жидкой и осажденной части, представлены подтвержденные запасы по содержанию лития в рассолах, приведены результаты по его извлечению методом сорбции.

Ключевые слова: подземные рассолы, литий, сорбция, прямая экстракция лития, ионная флотация

Abstract. This paper describes the potential for exploiting the hydromineral resources of the Siberian Platform in the Irkutsk Region as a source for extracting valuable macrocomponents and rare elements, primarily lithium. The chemical and phase composition of brine samples in both the liquid and sedimentary phases is studied, confirmed lithium reserves in brines are presented, and results on lithium extraction by sorption are presented.

Keywords: ground brines, lithium, sorption, direct lithium extraction, ion flotation

Подземные рассолы Сибирской платформы рассматриваются как перспективный источник гидроминерального сырья, что подтверждается имеющимися прогнозными оценками запасов. Высокоминерализованные воды этого региона отличаются уникальным химическим составом. Содержащиеся в них ценные компоненты – кальций, магний, калий, бром, литий, стронций, рубидий и другие – присутствуют в концентрациях, существенно превышающих промышленно значимые уровни. Особое стратегическое значение придается литию в контексте необходимости импортозамещения поставок из стран Южной Америки. В связи с этим комплексная переработка рассолов Восточной Сибири признается экономически обоснованной и целесообразной [1].

Основной метод добычи лития из гидроминерального сырья многие годы – выпаривание рассолов под солнцем. Он применяется в Южной Америке, Китае, США и Северной Африке. Эффективность зависит от состава сырья, климата и экологических норм. Метод считается альтернативой добыче из твердых пород, но имеет свои сложности, результат во многом зависит от состава рассолов, климата, длительности процесса, интенсивности использования воды и экологических требований [5].

Ведущие страны-производители лития сегодня переходят от медленного и ресурсозатратного выпаривания рассолов к прямым методам извлечения лития (direct lithium extraction – DLE). Новые технологии, такие как экстракция растворителем, сорбция, ионный обмен, мембраны, электрохимические процессы, ускоряют процесс и снижают экологический ущерб от испарительных прудов и химических реагентов [6].

Процесс DLE начинается с забора рассола и его предварительной очистки. Затем с помощью селективных сорбентов или мембран извлекаются только ионы лития. Далее проводят операции извлечения лития из экстрагента или концентрированного раствора, в зависимости от применяемого метода. Для получения высокочистых литиевых соединений или металлического лития могут быть использованы различные химические процессы, реакции осаждения или методы электроосаждения. Преимуществом процесса является возможность регенерации реагентов, что снижает себестоимость и увеличивает количество отходов [7].

В отечественной практике также возрос интерес к прямому извлечению лития из подземных рассолов вследствие необходимости замены поставок импортного лития, а также отсутствия в настоящий момент разработок по извлечению лития из месторождений твердых полезных ископаемых. Известно много публикаций коллектива авторов Коцупало Н.П., Рябцева А.Д. и др. по разработке технологии извлечения лития из подземного

гидроминерального сырья, основанной на принципе селективной сорбции [4]. Авторами разработан эффективный неорганический сорбент ДГАЛ-С1 на базе соединения $\text{LiCl} \cdot 2\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ с дефицитом хлорида лития в составе. ДГАЛ-С1 за счет возможности обратимого изменения содержания LiCl в составе сорбента позволил селективно извлечь хлорид лития из многокомпонентных рассолов с последующей его десорбцией из насыщенного им сорбента пресной водой с получением первичного литиевого концентрата. Далее после очистки и концентрирования получали карбонат лития. В КНР введено в эксплуатацию промышленное производство гранулированного ДГАЛ-С1. Сорбент был опробован на подземных рассолах Сибирской платформы, Северо-Кавказского региона и озерных рассолах КНР, где запущено промышленное предприятие по производству технического карбоната лития из рассолов оз. Дабсан-Нур [3].

Проведены исследования химического и фазового состава проб подземных рассолов с одного из участков нефтегазоносной площади на территории Сибирской платформы. Рассол характеризуется высокими содержаниями Ca , Mg , Br , Sr , Rb , Cl . Кроме того, в исследуемой общей пробе рассола с растворенным осадком (№ 4) содержится 611.96 мг/дм^3 лития, что сопоставимо с концентрациями лития в южноамериканских сalaraх; например, среднее содержание лития месторождения Омбрэ Муэрто в Аргентине составляет $520 - 620 \text{ мг/дм}^3$; месторождения Уюни в Боливии – $320 - 532 \text{ мг/дм}^3$. При этом содержание лития в месторождениях Китая Синтай и Дунтай, а также на Сильвер Пик в США ниже и концентрация металла составляет, соответственно, 300 мг/дм^3 и 200 мг/дм^3 [2]. Фазовый состав выпавшего осадка рассола: гидрат хлорида кальция ($\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), карналлит ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), тахидрит ($\text{CaMg}_2\text{Cl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) и гидрат хлорида стронция ($\text{SrCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Выполненные предварительные исследования по извлечению лития из вышеуказанного рассола показали, что на предварительной стадии в связи с высоким содержанием в рассолах двухвалентного железа необходимо его удаление с переводом в осадок трехвалентного железа путем подщелачивания рассола.

Сорбция – десорбция лития из рассола проводилась в установленных ранее режимах с доочисткой черного литиевого концентрата на сульфокатионите.

В результате получен литиевый продукт с содержанием лития более 86 %. В дальнейшем он направлялся на получение карбоната лития, выпаривание и сушку. Показатели извлечения компонентов рассола в целевой литийсодержащий продукт (карбонат лития) после предварительного осаждения макрокомпонентов и последующей очистки литиевого продукта, полученного сорбционным методом, указывают на эффективность операций технологической схемы для селективного отделения лития от макрокомпонентов (таблица).

Характеристики исходного рассола, полученного литийсодержащего продукта и показатели извлечения

Продукт	Единица измерения	Концентрация компонентов							
		K^+	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Fe^{2+}	Cl^-	Li^+	Sr^{2+}
Исходный рассол	г/дм^3	9.364	3.015	32.350	146.252	541.08	354.230	0.547	6.650
Li-содержащий продукт	г/дм^3	1.431	1.323	0.061	0.262	0.100	4.542	0.475	0.108
Извлечение в Li-содержащий продукт	%	15.28	43.88	0.19	0.18	0.02	1.28	86.84	1.62

Примечание. Извлечение лития осуществляли по схеме, представленной на рисунке.

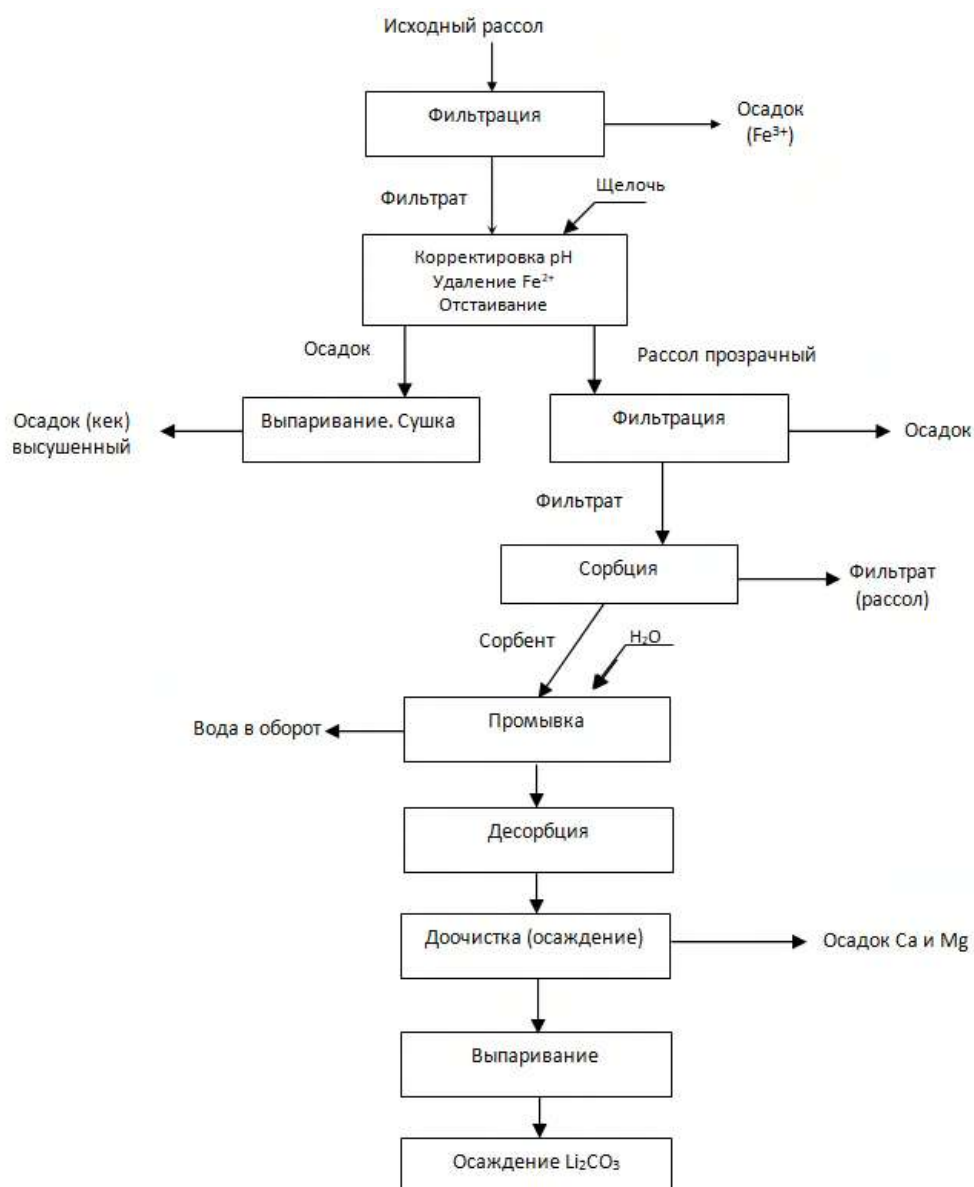


Схема экспериментальных исследований по извлечению лития.

Предварительное выведение из процесса макрокомпонентов позволяет в операциях сорбции – десорбции с последующей доочисткой на сульфокатионите выделить литиевый продукт, который содержит около 0.5 г/дм³ лития с минимальным количеством примесей и извлечением более 86 %. Выведение из рассола кальция производится путем его осаждения, удаление железа достигается путем осаждения железа (III) гидроксида при увеличении pH среды до 7.0–7.5 введением раствора щелочи. Концентрация кальция при этом снижается до 0.18 % от исходной концентрации (в 560 раз), калия – до 15 % от исходной (в 6.54 раза), магния – до 0.19 % от исходной (в 530), железа (II) – менее 0.02 % от исходной (более чем в 5000 раз).

Полученные результаты демонстрируют возможности получения литийсодержащего продукта с высокой чистотой и с высокой степенью извлечения (до 88 %) из подземных рассолов Сибирской платформы по методу прямого извлечения с применением сорбционной технологии. Однако гидроминеральные ресурсы Сибирской платформы имеют многокомпонентный состав и высокую минерализацию макрокомпонентов. Проведенные исследования показывают сложность получения высококачественного чистого литийсодержащего продукта путем даже многократной очистки; кроме того, часть лития может уходить в потери на стадиях предварительного осаждения других компонентов: железа, кальция, магния.

Для эффективного извлечения лития и получения соединений лития высокой чистоты, а также других ценных компонентов может рассматриваться метод ионной флотации. Это особый метод разделения, который включает добавление поверхностно-активных веществ или собирателей с зарядами, противоположными зарядам целевых ионов, для образования комплекса поверхностно-активных веществ, а затем сбор ионов путем пропускания пузырьков газа через раствор. Несмотря на то, что ионная флотация практически не внедрена в промышленное извлечение компонентов, она является перспективной технологией, позволяющей получать концентраты с содержанием редкоземельных элементов 60–70 % и более [8].

При этом физико-химические процессы извлечения лития с использованием его ионной флотации недостаточно изучены, данные об используемых флотореагентах практически отсутствуют, оборудование, традиционно используемое для ионной флотации, далеко не оптимизировано, что говорит о перспективах и необходимости изучения процесса и для выявления возможностей значительного повышения показателей.

Список литературы

1. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Вахромеев А.Г., Шмаров Г.П. Литиеносные подземные воды Иркутской области и Западной Якутии // Горный журнал. 2012. № 2. С. 8–13.
2. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Вахромеев А.Г., Владимиров А.Г., Волкова Н.И. Литиевые подземные воды Иркутской области и Западной Якутии // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. № 20. С. 27–33.
3. Научные основы производства селективного к литию сорбента и промышленной технологии извлечения хлорида лития из гидроминерального поликомпонентного сырья / А. Д. Рябцев, Н. П. Коцупало, Л. Т. Менжерес и др. // Химическая технология. 2020. Т. 21, № 8. С. 338–352. DOI 10.31044/1684-5811-2020-21-8-338-352. – EDN ZPHMGS.
4. Коцупало Н.П., Рябцев А.Д. Интеркаляционные соединения гидроксида алюминия с солями лития и их использование в промышленной практике. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2016. 155 с.
5. Alessia A., Alessandro B., Maria V.G., Carlos V.A., Francesca B. Challenges for sustainable lithium supply: a critical review // J. Clean. Prod. 2021. Vol. 300. Art. no. 126954. – DOI 10.1016/J.JCLEPRO.2021.126954.
6. Krishnan R., Gopan G. A comprehensive review of lithium extraction: From historical perspectives to emerging technologies, storage, and environmental considerations // Cleaner Engineering and Technology. 2024. Vol. 20. Art. no. 100749. – DOI 10.1016/j.clet.2024.100749.
7. Bosch P., Contreras J.P., Munizaga-Rosas J. Feasibility and cost minimisation for a lithium extraction problem // Comput. Oper. Res. 2020. Vol. 115. Art. no. 104724. DOI 10.1016/J.COR.2019.05.029.
8. Chang L., Cao Y., Fan G., Li C., Peng W. A review of the applications of ion floatation: wastewater treatment, mineral beneficiation and hydrometallurgy // RSC Advances. 2019. Vol. 9, Issue 35. P. 20226–20239. DOI 10.1039/c9ra02905b.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ТРАНЗИТА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ТРАНСГРАНИЧНОЕ ОЗЕРО ХАНКА (ПРИМОРСКИЙ КРАЙ РФ)

Шайгузов Р. С., Шамов В. В

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, vlshamov@yandex.ru

Аннотация. Трансграничное мелководное озеро Ханка, расположенное в основном в пределах Приморского края РФ, испытывает значительные многолетние колебания уровня воды (УВ) под действием как естественных, так и антропогенных факторов. Механизмы естественных колебаний УВ остаются неясными, в связи с чем в данной работе анализируется тесная связь УВ в озере с колебаниями предшествующего увлажнения его бассейна в виде атмосферных осадков и бокового притока. Статистический анализ данных 61-летних стандартных гидрологических и метеорологических наблюдений дал основание полагать, что задержка отклика среднего годового УВ в озере на выпавшие атмосферные осадки составляет 5–6 лет и связана с их инфильтрацией и аккумуляцией в бассейне озера и медленной разгрузкой подземных вод в озеро.

Ключевые слова: озеро Ханка, уровень воды, подземные воды, циклы водности

Abstract. Water level (WL) fluctuations in the shallow transboundary Khanka Lake, Pacific Russia are driven by both natural and anthropogenic factors. The processes of natural fluctuations are still unclear. We found a tight relationship between WL and previous basin wetting, represented by precipitation and river inflow to the lake, over a multi-year period. Our statistical analysis of 61-years standard hydrological and meteorological data allows to assume that the time lag in the response of the lake's mean annual WL to precipitation is about 5–6 years. This time lag is associated with atmospheric water infiltration and accumulation in the Khanka Lake basin and subsequent slow groundwater discharge into the lake.

Keywords: the Khanka Lake, water level, groundwater, long-term water cycles

Озеро Ханка – крупнейший пресноводный водоем в Северо-Восточной Азии, разделенный границей между РФ и КНР. Площадь водной поверхности составляет в среднем 4070 км², а объем воды – 18.3 км³. Средняя глубина озера находится в пределах 5.0–6.5 м при максимальной 11 м. Водосбор озера относится к бассейну р. Амур, его геоморфологическая площадь без учета площади зеркала озера составляет 16890 км² [2].

Основными приходными составляющими водного баланса озера являются осадки, выпадающие на его зеркало, и боковой приток. В среднем за многолетие в пределах водосбора озера ежегодно выпадает около 600 мм осадков, а суммарный речной приток составляет 124 мм (2.1 км³). Основные расходные составляющие – испарение с зеркала (также около 600 мм) и сток вытекающей из озера р. Сунгача (72 мм, или 1.5 км³) [2].

В силу большой площади зеркала и малых глубин озеру свойственны значительные колебания УВ, как многолетние и сезонные (с амплитудой до 2 м), контролируемые гидрометеорологическими условиями на водосборе озера, так и синоптические и суточные (с амплитудой до 1.5 м) – вследствие ветровых децивеляций (сгоны и нагоны). Многолетние колебания УВ (фазы водности) обусловлены процессами атмосферной циркуляции [5]. Вклад в колебания вносят и антропогенные факторы: в основном это сброс паводковых вод из р. Мулинхэ (КНР) через систему каналов в оз. Ханка и р. Сунгача [12].

Анализу механизмов естественных колебаний УВ в озерах посвящен ряд исследований [3, 9, 11, 12]. Так, в статье [11] утверждается, что если осадки, выпадающие на зеркало озера, напрямую влияют на УВ в нем, то осадки, выпадающие на поверхность водосбора, могут в течение длительного времени – от нескольких месяцев (сток верховодки) до нескольких лет (сток глубоких грунтовых вод) – просачиваться в почву и мигрировать к области их разгрузки, влияя на УВ. При этом время добегания выпавших осадков (период задержки отклика УВ осадки) успешно рассчитывается для рек, но не для озер.

Проблемой остается то, что в существующих водобалансовых расчетах для оз. Ханка подземный сток, по которому можно было бы точно оценить время его разгрузки, не учитывается. В ранних работах отмечается его практическое отсутствие [1], тогда как более поздние исследования свидетельствуют в пользу субаквальной разгрузки подземных вод в ложе озера [8] благодаря наличию сложного артезианского бассейна [7], а также процессам гидроморфизма почв в пределах Приханкайской низменности в теплый период года [6].

С помощью статистических методов авторами получена оценка времени реакции среднегодовых УВ в оз. Ханка на атмосферное увлажнение его бассейна и речной приток.

Для того чтобы отобразить атмосферное увлажнение в бассейне за предшествующие годы, пока достаточно прибегнуть к простой операции – суммированию формирующих увлажнение переменных. Основным в этой категории является количество осадков (P , мм), выпавших на поверхность водосбора озера за год. Отдельно стоит учитывать и годовой речной сток (Q , км³), поскольку он отражает те же выпавшие осадки за исключением объема эвапотранспирации [3]. Таким способом проведено суммирование годовых значений осадков для нарастающих от текущего года в прошлое комбинаций лет (2-леток, 3-леток, 4-леток и т.д.). Длина выборок при этом изменяется незначительно, они принимаются статистически однородными, что позволяет их сравнивать без потери достоверности.

Корреляционное сравнение годовых сумм осадков и стока проводилось с величинами среднего УВ за текущий год. Для этого применялся коэффициент корреляции R . Принято считать, что достаточная для практических целей теснота связи определяется значениями $|R| \geq 0.75$ [4]. Для расчетов использованы данные наблюдений в бассейне озера за период с 1960 по 2020 г., выполненных Приморским управлением ГМС России. Регулярные измерения УВ проводятся на двух озерных постах – Астраханка и Турий Рог – 1947 г. В силу их расположения и сильных ветровых денивелиций посты лишь приблизительно отражают УВ, усредненный по площади зеркала на текущий момент. В анализе использован ряд УВ с исключением сгонов и нагонов, полученный ранее в [9], который при дальнейшем сравнении с осадками и стоком демонстрирует более тесную связь.

В пределах бассейна озера расположены 15 метеостанций, в наблюдениях на некоторых из них содержатся пропуски в несколько лет. Поскольку для оценки общего увлажнения в бассейне осадки усреднены, пропуски в данных наблюдений были восстановлены из смоделированной глобальной базы климатических данных высокого пространственного разрешения [10]. Смоделированные значения показали высокую связь с реальными измерениями за совместный период наблюдений, тем самым заполнение пропусков не снизило уровень достоверности анализируемых данных. Нужно учесть, что осадки, измеренные в пунктах, неравномерно распределенных на водосборе, лишь приблизительно отражают поле генетически однородных осадков и их реальное количество.

Данные о совокупном речном притоке в озеро взяты из монографии [2], поскольку они включают сток не только с российской части водосбора, но и с китайской. Однако выборка данных, приведенная в указанной монографии, ограничена 2015 г. На основе имеющихся данных о стоке основных российских притоков (реки Мельгуновка, Комиссаровка, Илистая и Спасовка) в их замыкающих створах с помощью метода гидрологической аналогии ряд данных восстановлен до 2020 г.

Проведенные расчеты указывают на практическое отсутствие связи среднегодовых УВ с выпавшими на его водосбор осадками и речным притоком этого же года. Если же учитывать осадки и приток в сумме с предыдущими годами, то связь с УВ за текущий год становится более тесной: коэффициент корреляции увеличивается по мере нарастания числа комбинируемых годовых сумм осадков за предшествующие годы (таблица).

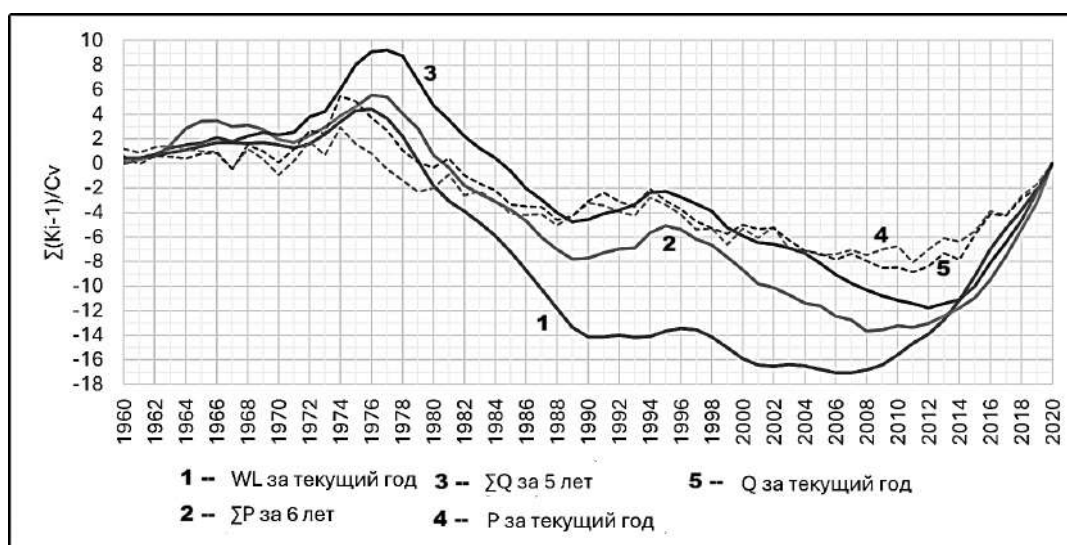
Тесная связь УВ с накопленной суммой осадков отмечается в комбинациях от 4 до 8 лет, а с суммой притока – от 3 до 6 лет. При этом максимальный коэффициент корреляции достигается в случаях 6 и 5 лет соответственно и в среднем по двум озерным постам составляет 0.84 и 0.82. После достижения максимума связь с каждой последующей суммой постепенно ослабляется, но менее резко, чем при ее нарастании в первых комбинациях лет. Очевидно, предшествующее многолетнее увлажнение бассейна значимо влияет на УВ в озере, что отражается в разностных интегральных кривых, на которых видна синхронность хода УВ с суммами осадков и притока (рисунок).

Во время первой многоводной фазы за анализируемый период увеличение количества годовых осадков началось в 1968 г., достигнув максимума в 1974 г., что через 6 лет от начала увеличения прямо отразилось на значительном повышении УВ в озере в 1973–1975 гг.

Коэффициенты корреляции (r) между среднегодовыми УВ и суммами приходных составляющих водного баланса озера с учетом предшествующих лет (1960–2020 гг.)

УВ	Y_1	ΣY_2	ΣY_3	ΣY_4	ΣY_5	ΣY_6	ΣY_7	ΣY_8	ΣY_9	ΣY_{10}
Осадки, выпавшие на водосбор										
Астраханка	0.304	0.563	0.722	0.790	0.820	0.844	0.807	0.785	0.753	0.723
Турий Рог	0.290	0.547	0.707	0.778	0.808	0.830	0.793	0.770	0.738	0.707
Средний	0.297	0.556	0.715	0.785	0.814	0.837	0.800	0.778	0.745	0.715
Речной приток с водосбора										
Астраханка	0.463	0.685	0.799	0.813	0.822	0.798	0.742	0.702	0.664	0.629
Турий Рог	0.448	0.670	0.785	0.800	0.808	0.784	0.728	0.687	0.648	0.611
Средний	0.456	0.678	0.792	0.807	0.815	0.791	0.735	0.695	0.656	0.620

Примечание. ΣY_i – сумма значений за i количество лет (1 – только за текущий год, 2 – сумма за текущий и предыдущий, 3 – сумма за текущий и два предыдущих и т.д.).



Разностные интегральные кривые УВ (WL), осадков (P) и притока (Q) в озеро.

В маловодную фазу, с 1975 г., также в течение 6 лет происходило понижение УВ до минимума в 1980 г. Аналогичные ситуации с задержкой и откликом происходили в последующие фазы водности на экстремумах 1995 г. (нарастание осадков с 1989 г., максимум УВ в 1995 г. и низкий – в 2000 г.) и 2016 г. (нарастание осадков с 2012 г., максимальный за рассматриваемый период УВ в 2016 г. и его последующее снижение).

Отмеченная закономерность указывает на наличие условной долговременной «памяти» озера, как бы хранящей гидрометеорологические события предшествующих лет. Условно такую «память» можно измерить теснотой связи УВ с осадками и речным притоком, сформированными и накопившимися за предшествующие годы. Синхронность хода рядов УВ и сумм осадков подтверждает выявленную ранее [1, 2] зависимость естественных колебаний УВ в оз. Ханка от цикличности атмосферного увлажнения в бассейне – в данном случае от многолетних циклов муссонной циркуляции, отдельные фазы которой длятся в среднем 6 лет и отражают тренды нарастания или уменьшения аккумулированных сумм осадков и, соответственно, УВ в озеро.

Большая часть выпавших осадков, как известно, расходуется на эвапотранспирацию и быстрый сток, а оставшаяся их часть, просачиваясь, пополняет запас подземных вод или, если скорость инфильтрации мала [6], пополняет запас верховодки и способствует заболачиванию почв. Просочившаяся доля атмосферных вод в силу относительно небольшого объема, периферийного расположения зон питания и медленной скорости миграции за один год разгрузиться в озеро не успевает, а отклик УВ озера на эту часть притока запаздывает, что подтверждается многолетней динамикой речного стока в озеро.

Речной приток включает долю быстрого стока, который достигает водоема за несколько дней – недель, а также дренируемый объем подземных вод. И если, как отмечалось выше, связь среднего УВ в озере с речным стоком того же года отсутствует, то начиная с притока, суммированного за предшествующие три года, эта связь проявляется, вероятно, за счет постепенной разгрузки накопившихся за три года подземных вод, а уже за предшествующие пять – шесть лет – за счет разгрузки бассейнового влагозапаса, сформированного в течение фазы цикла атмосферного увлажнения. Таким образом, накопившийся и удержанный водосбором в течение минимум трех лет остаток выпавших осадков в виде некоторого запаса подземных вод отражается на УВ в озере текущего года, что вполне согласуется с выводами в [9].

Также стоит учесть тот факт, что на УВ в озере влияют и антропогенные факторы, которые, вероятно, имеют нерегулярный характер [12] и вносят определенный “шум” в тесноту связи, в результате чего она может ухудшаться, показывая тем самым нарушения в естественных процессах разгрузки подземных вод и отклика УВ в озере на них.

Таким образом, на основе выявленных статистических связей среднегодовых УВ в оз. Ханка и предшествующего многолетнего увлажнения его бассейна подтверждается вывод о контроле многолетних колебаний УВ со стороны процессов муссонной циркуляции, выраженной в виде 6-летних фаз нарастания/спада годовых сумм осадков. Поскольку явная корреляция между УВ и увлажнением бассейна начинает отмечаться раньше, предполагается, что это связано с началом разгрузки в озеро подземных вод, аккумулированных водосбором за предыдущие минимум три года, вызывая некоторую реакцию УВ в озере в текущем году.

Полученный результат имеет приближенный характер из-за погрешностей в измерениях, пространственной неоднородности осадков, вмешательства человека, учесть которые в полном объеме пока представляется затруднительным или невозможным.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 25-47-00022).

Список литературы

1. Васьковский М.Г. Гидрологический режим озера Ханка Л.: Гидрометеиздат. 1978. 175 с.
2. Водный баланс озера Ханка и его изменения под влиянием природных и антропогенных факторов / Под ред. В. Ю. Георгиевского. СПб.: Изд-во гос. гидрологич. ин-та, 2022. 272 с.
3. Выручалкина Т.Ю., Филатов Н.Н., Дианский А.В., Гусев А.В. О прогнозе многолетних изменений уровня воды крупных озер // Тр. Карельского науч. центра РАН. 2016. № 9. С. 3–16.
4. Лучшева, А. А. Практическая гидрология. Л.: Гидрометеиздат. 1978. 440 с.
5. Пономарев, В.И. Особенности климатических режимов в северной части Азиатско-Тихоокеанского региона / В. И. Пономарев, Е.В. Дмитриева, С.П.Шкорба // Системы контроля окружающей среды. 2015. № 1 (21). С. 67–72.
6. Росликова В.И., Рыбачук Н.А., Короткий А.М. Атлас почв юга Дальнего Востока России (Приханкайская низменность). Владивосток: Дальнаука. 2010. 247 с.
7. Рынков В.С. Подземные воды Дальнего Востока. Учеб. пособие. Владивосток: Врл-dj ДВПИ. 1988. 88 с.
8. Чудаева В. А. Миграция химических элементов в водах Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2002. 392 с.
9. Bugaets A.N., Bugaets A. N., Bugaets A. N., Lupakov S. Yu., Gonchukov L.V., Shamov V. V. The influence of tributary runoff components on the dynamics of the Khanka Lake level // Water Resources. 2025. V. 52. No. 5. P. 843–852.
10. Harris I., Osborn T.J., Jones P.D., Lister D.H. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset // Scientific Data. 2020. No. 7: 109. URL: <https://www.worldclim.org/data/index.html>.
11. Iwaki M., Yamashiki Y., Toda T., Jiao C., Kumagai M. Estimation of the average retention time of precipitation at the surface of a catchment area for Lake Biwa // Water. 2021. No. 13(12): 1711. URL: <https://doi.org/10.3390/w13121711>.
12. Xiao F., Wang X., Impacts C. Fu. of land use/land cover and climate change on hydrological cycle in the Xiaoxingkai Lake Basin // J. of Hydrol.: Regional Studies. 2023. No. 47: 101422. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101422>.

SEASONAL INVESTIGATION OF FRESHWATER RESOURCES FEEDINGS GÖKOVA BAY (MUGLA, TURKEY)

Acar Y., Kaçan K., Olgun B., Özdemir N.

Fisheries of Faculty, Mugla Sıtkı Kocman University, Mugla, Türkiye, onedim@mu.edu.tr

Аннотация. Залив Гёкова – это важный туристический объект на юго-западе Турции и юго-востоке Эгейского моря. Этот район, представляющий собой тихий уголок зимой, оживает летом, в туристический сезон. Исследование проводилось сезонно с августа 2023 г. по апрель 2024 г. в долинах руч. Кады, Акчапинар и Чамлы, воды которых являются одним из источников пресной воды, питающих залив Гёкова. В ходе исследования отобраны пробы воды из 15 различных стратегических точек пресноводных источников, питающих залив Гёкова, и проанализированы некоторые их физико-химические параметры. Анализ проб воды выполнен в аккредитованной лаборатории в научно-исследовательском центре Университета Мугла Ситки Кочман. Установлено, что в результате интенсивной туристической деятельности, чрезмерного использования прибрежных полос, обслуживания судов на судоремонтных верфях и ежедневных морских прогулок происходит ухудшение показателей качества воды в некоторых точках отбора и рост уровня загрязнения окружающей среды.

Ключевые слова: залив Гёкова, качество воды, воздействие на окружающую среду, пресноводные ресурсы.

Abstract. Gökova Bay is a sensitive tourism in southern west of Turkey and on the southern east of Aegean Sea. The research area which is a quiet town in the winter, becomes lively in the summer during the tourism season. This study was carried out in Kadın and Akçapınar Creek and Çamlı Stream, which are among the freshwater sources feeding the Bay of Gökova. In this study, which was conducted seasonally between August 2023-and April 2024, water samples were taken from 15 different strategic points from the freshwater resources feeding the Bay of Gökova and some physico-chemical parameters were analyzed. Physico-chemical of analyses of the water samples collected from the selected stations were carried out at accredited Water Analysis Laboratory in Research Laboratories Center of Muğla Sıtkı Koçman University. When the results of the analysis were examined, it was determined that as a result of intense tourism activities, overuse of coastal lines, maintenance of boats in boat yards and daily boat trips, deteriorations in water quality values in the samples collected from some stations and increases in the amount of environmental pollution occur.

Keywords: Gökova Bay; water quality, environmental impacts; freshwater resources.

Recently in settlement areas in Turkey, similar to many other parts of the world, the fresh water systems and natural structures of the sea, especially the ones under the pressure of various organic and inorganic pollutants, are being deformed and these regions which are quite productive in terms of fishery products are getting infertile because of the population growth, industrialization, intense agricultural activities and agricultural malpractices [1].

It has been expressed that, caused by pollution in one hand and unplanned utilization and developments in the other, coastal areas and seas of Turkey lost their prosperity of natural resources and according to international standards, in many parts of Turkey, coastal waters especially gulfs and estuaries have high pollution percentages [2, 3].

The reason of these are; unplanned and unhealthy developments on the coastal zones, transportation deficiencies, water pollution caused by discharging the urban sewage into the sea without treatment, dumping garbage into the sea, and as the most important change occurring in the water environment is the transportation of land originated materials to the coastal areas, thus to face many problems such as eutrophication [4].

The Mediterranean Region is one of the world's top mass tourism destinations and tourist flows to this region are constantly increasing. The tourism trade benefits from the quality and variety of the region's natural heritage and landscapes. But its rapid development following the rise in the standard of living and increase in leisure time is taking a toll on the environment. Thus, Gökova Bay has been chosen as a research area where Turkey's southwest Mediterranean Sea with the Aegean Sea in a junction region. Gökova Bay is a sensitive tourism in southern west of Turkey and on the southern east of Aegean Sea. The research area which is a quiet town in the winter, becomes lively in the summer during the tourism season [5, 6, 7, 8, 9].

In this study, which was conducted seasonally between August 2023 and April 2024, water samples were taken from 15 different strategic points (Figure) from the freshwater resources feeding the Bay of Gökova and some physico-chemical parameters were analyzed. Physico-chemical of

analyses of the water samples collected from the selected stations were carried out at accredited Water Analysis Laboratory in Research Laboratories Center of Muğla Sıtkı Koçman University.



Introduction of stations in the research area

Results of the study were determined as: water temperature (15,00- 28,60 °C), pH (7,03-8,80), electrical conductivity (513-52516 $\mu\text{S}/\text{cm}$), Salinity (0,25-34,57 ‰) dissolved oxygen (1,19 -9,73 mg/L), oxygen saturation (8,12-100,60 %), BOI5 (0,89-7,22 mg/L), nitrite nitrogen (BDL-0,02 mg/L), nitrate nitrogen (BDL-3,22 mg/L), ammonia nitrogen (0,01-0,56 mg/L), suspended solids (0,63-178,33 mg/L), total phosphorus (BDL-2,44 mg/L) and ortho-phosphate (BDL-0,19 mg/L). Physico-chemical datas were evaluated in accordance with the Legislation of Water Pollution Control. As a conclusion of this study the pollution in Kadın Creek, Akçapınar Creek and Çamlı Stream were seen to be mostly influenced by a combination of tourism activities, domestic waste and daily boat traffic.

In consequence of this evaluation, it is considered that the pollution in Gökova Bay was caused by mostly mixed of tourism activities and anthropogenic factors (most of agricultural activities, wastewater and pesticide).

References

1. Döndü M. Spatial Analysis and Evaluation of Some Physicochemical Parameters in Freshwater Sources Feeding Gökova Bay Using Geographic Information System. Master's Thesis (Published). 2015. MSKÜ, Institute of Science. P. 129.
2. Erdiç S.Ö. Water Quality Analysis of Kadın Azmağı and Akçapınar Azmağı Streams Feeding Gökova Bay: Master's Thesis. 2010. Muğla: Muğla University Institute of Science. 88 p.
3. Göksu Z. L. Water Pollution. Akademisyen Kitapevi, Balcalı Ankara. 2015. P. 200.
4. Gülşen H. İ. Pollution Analysis of Bottom Sediments of Köyceğiz Lake and Fethiye–Göcek Bay, SW Turkey: Master's Thesis. Muğla: Muğla Sıtkı Koçman University. 2017. 120 p.
5. Kayan I. Physical Geography Research in Gökova and its Surroundings // Ankara University Journal of Geographical Studies. Issue: 3-4. 1971. Pp. 295–336.
6. Kushan D., Yusufoglu A. () Gökova Special Environmental Protection Area // Proceedings of the Türkiye Coasts '08 Congress. 2008. Ankara, P. 532.
7. Maraşlıoğlu F., Gönüloğlu A., Bektaş S. Assessment of Water Quality in Mert Stream (Samsun, Turkey) Base on Some Physico-chemical Parameters // Ecology Symposium: Proceedings Book of Full Papers, Kayseri, Turkey. 2017. Pp. 77–89.
8. Water Quality and Marine Biodiversity in the Inner Gulf of Gökova / A.N. Tarkan // Muğla University Publication, SMAP III Gökova Project. 2009. Pp. 6–12.
9. Yüksek, Y. Investigation of the Water Quality of Çamlı Stream Feeding Gökova Bay, TÜBİTAK 2209 Student Project. Muğla. 2015.

IV. ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ В РЕГИОНАХ С КОНТРАСТНЫМИ ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫМИ И КЛИМАТИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ГЕНЕЗИС НАЛЕДЕЙ В ЗОНЕ АВТОДОРОГИ «ЛЕНА» (УЧАСТОК НЕВЕР – ТОММОТ)

Баишев Н.Е., Огонеров В.В., Данзанова М.В.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, nyurgunbaishev@mail.ru

Аннотация. В статье приводятся данные гидрохимического исследования наледей, формирующихся вдоль федеральной автодороги А-360 «Лена» на участке Невер – Томмот. Установлено, что химический состав природно-техногенных и природных наледей наследует состав наледеобразующих вод, при этом минерализация льда ниже минерализации питающих вод. Гидрокарбонатный класс вод характерен для наледей, формирующихся в руслах и поймах рек, что свидетельствует об их питании за счет инфильтрационных и подрусовых вод. Повышенные содержания сульфат-иона являются маркером разгрузки подземных вод глубокой циркуляции, приуроченных к зонам тектонических нарушений. Аномально высокое содержание хлор-иона в пробе наледных вод вблизи г. Тынды указывает на техногенное загрязнение противогололедными реагентами или хозяйственно-бытовыми стоками.

Ключевые слова: природная и природно-техногенная наледь, химический состав наледей, федеральная автодорога «Лена», Южная Якутия, Амурская область

Abstract. This article presents data from a hydrochemical study of aufeis forming along the Lena Highway in the Never-Tommot section. It was found that the chemical composition of natural and natural-technogenic aufeis follows the composition of the aufeis-forming waters, with ice mineralization lower than that of the feeder waters. The bicarbonate waters are characteristic of aufeis forming in riverbeds and floodplains, indicating their recharge from infiltration and subchannel waters. Elevated sulfate-ion contents are a marker of deep-circulation groundwater discharge associated with tectonic fault zones. An abnormally high chloride ion content in a sample of aufeis waters near the city of Tynda indicates man-made pollution by anti-icing agents or household waste.

Keywords: natural and natural-technogenic aufeis, chemical composition of aufeis, Lena Highway, South Yakutia, Amur Region

В районах распространения многолетнемерзлых пород (ММП) и глубокого сезонного промерзания строительство линейных инженерных сооружений может способствовать нарушению мерзлотно-гидрогеологических и гидрологических условий, что провоцирует формирование наледей на участках, где раньше их не было. Такие криогенные образования были классифицированы как природно-техногенные наледы (ПТН) [4]. Наглядным примером района, где образование ПТН представляет собой геокриологическую опасность, является полоса Амуро-Якутской магистрали (АЯМ, ныне федеральная автодорога А-360 «Лена» (ФАД «Лена»)) от пос. Невер (Амурская область) до г. Томмот (Республика Саха (Якутия)) [1, 8]. Аналогичные проблемы, связанные с негативным влиянием наледей на линейные сооружения в криолитозоне, активно изучаются в Китае [13], Канаде [15] и на Аляске [14].

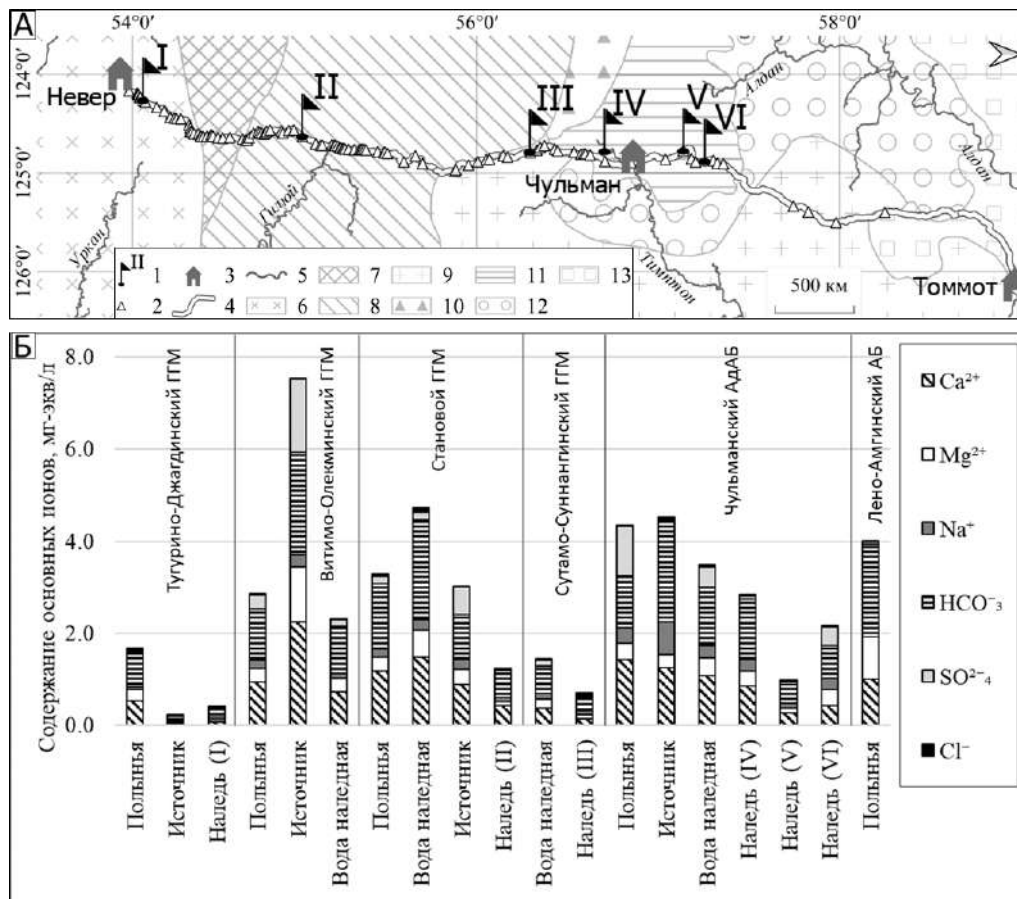
В зимний период натурные обследования родниковых вод часто затруднены, так как источники подземных вод скрыты наледью, а места их выхода на поверхность мигрируют. В таких условиях для определения доли участия различных типов наледеобразующих вод применяется классический метод режимных ледемерных съемок [10]. Однако при регулярной расчистке дорожными службами наледей, угрожающих линейным сооружениям, проведение таких съемок для отслеживания динамики роста наледей становится крайне сложным, что не позволяет косвенно определить типы питающих их вод (генезис наледей). В качестве альтернативного решения данной задачи широко используется гидрохимический метод.

Данный метод основан на анализе содержания макрокомпонентов в образцах льда, отобранных из разреза наледей. Важно отметить, что химический состав наледей не всегда тождественен составу воды, его питающей, поскольку на распределение минерализации и ее

компонентов влияют также скорость льдообразования, дебит и режим разгрузки подземных вод, особенности рельефа и снегонакопления на участках формирования наледей [2, 3, 5].

Целью выполненных исследований являлось изучение химического состава наледей вдоль ФАД «Лена».

Район исследований расположен на юге Восточной Сибири, где ФАД «Лена» проходит от пос. Невер до г. Томмот (рисунок, А).



А – карта-схема расположения наледей вдоль ФАД «Лена»: 1 – ключевые участки и их номера, 2 – наледы, 3 – населенные пункты, 4 – трасса ФАД «Лена», 5 – реки. 6–13 – гидрогеологические структуры: 6 – Тугурино-Джагдинский ГГМ, 7 – Витимо-Олекминский ГГМ, 8 – Становой ГГМ, 9 – Сутамо-Суннангинский ГГМ, 10 – Южно-Алданский ГГМ, 11 – Чульманский АдаБ, 12 – Алдано-Тимптонский ГГМ, 13 – Лено-Амгинский АБ. Б – средний химический состав наледей (I–VI), полей, источников подземных вод и вод, выходящих по трещинам наледных бугров, вокруг стволов деревьев и кустарников, по гидрогеологическим структурам.

Отрезок Невер – Томмот ФАД «Лена» проходит по таким гидрогеологическим структурам, как Тугурино-Джагдинский гидрогеологический массив (ГГМ), Витимо-Олекминский ГГМ, Становой ГГМ, Сутамо-Суннангинский ГГМ, Чульманский адартезианский бассейн (АдаБ), Алдано-Тимптонский ГГМ и Лено-Амгинский артезианский бассейн (АБ) [7]. Преимущественно подземные воды имеют гидрокарбонатный состав с различным катионным составом. Их минерализация изменяется от 100 до 1000 мг/дм³ [11]. Уровенный режим подземных вод на мониторинговых площадках зависит от количества выпавших атмосферных осадков [6]. Небольшие наледы формируются сезоннодействующими источниками деятельного слоя, а самые крупные – за счет вод подрусловых потоков и многодебитных источников подземных вод глубокой циркуляции (или подмерзлотных) [14].

Экспедиционные исследования наледей проводились в период с 2022 по 2025 г. Обследования выполнялись в соответствии с методиками, описанными в работе [10]. Для

отбора проб льда и изучения вертикального строения наледей использовалось бурение лунок мотобуром, а также проходка шурфов. Всего было выбрано шесть ключевых наледей, I – терраса р. Белая, II – русло и пойма руч. Бурухинский, III – русло и пойма р. Горбыллах, IV – русло и пойма р. Муустах, V – подрезанный склон р. Большой Дурай (Дурай-Склон), VI – безымянный приток р. Верхний Дурай (Дурай-Приток). Все шесть наледей формируются на трассе ФАД «Лена», кроме участка «Муустах».

В полевых условиях измерялся водородный показатель (рН), температура и общая минерализация (TDS, в ppm; $1 \text{ ppm} \approx 1 \text{ мг/дм}^3$) воды следующих объектов: рек и ручьев, полыней, источников подземных вод, а также вод, разгружающихся из трещин наледных бугров и вокруг стволов деревьев и кустарников с последующим растеканием по поверхности наледей.

Определение макрокомпонентного состава проб воды, льда и снега (здесь и далее подразумевается анализ расплавленных образцов) проводилось в лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН методами титриметрии и капиллярного электрофореза.

Статистическую и графоаналитическую обработку гидрохимических данных проводили в программе MS Excel. Всего обработано 45 проб вод, выходящих по трещинам наледных бугров, вокруг стволов деревьев и кустарников, в том числе воды полыней и источников подземных вод, а также 45 образцов льда из разрезов наледей. Химический состав апробированных природных вод усредняли по годам и гидрогеологическим структурам. Химический состав льдов наледей усредняли по годам.

Химический состав наледного льда на участке «Белая» гидрокарбонатный со смешанным катионным составом и минерализацией 17.9 мг/дм^3 , на участке «Бурухинский» – гидрокарбонатный кальциевый с минерализацией 49.4 мг/дм^3 , на участке «Горбыллах» – гидрокарбонатный натриево-кальциевый состав с минерализацией 30 мг/дм^3 , на участке «Муустах» – гидрокарбонатный кальциевый с минерализацией 106.5 мг/дм^3 , на участке «Дурай-Склон» – гидрокарбонатный кальциевый с минерализацией 40.3 мг/дм^3 , на участке «Дурай-Приток» – гидрокарбонатный со смешанным катионным составом и минерализацией 84.9 мг/дм^3 . На ключевых участках наледи как в природных, так и в техногенно нарушенных условиях менее минерализованы, чем питающие их воды. При этом химический тип наледобразующих вод наследуется при льдообразовании (рисунок, Б).

Обработка полученных данных показала, что гидрокарбонатный класс вод является основным для наледей, формирующихся непосредственно в руслах и поймах рек. Это указывает на питание наледей за счет инфильтрационных атмосферных и грунтовых вод четвертичных аллювиальных отложений, что характерно для участков с островным и прерывистым распространением ММП. Сульфатный класс вод и высокое содержание сульфат-иона (20–50 % (мг-экв/л)) в пробах однозначно трактуется как маркер разгрузки подземных вод глубокой циркуляции, приуроченных к зонам тектонических нарушений. Поступление сульфатов обусловлено окислением сульфидов в глубоких трещинных зонах. Обнаружение таких вод в местах пересечения дорогой тектонических разломов доказывает, что дорожная насыпь играет роль мерзлотного пояса и перегораживает естественные пути транзита подрусловых вод, питающихся глубинными водами (подмерзлотными), вызывая их разгрузку и формирование мощных ПТН. Аномально высокое содержание хлор-иона (23 % (мг-экв/л)) в одной пробе наледных вод на участке жилых домов (г. Томмот) является надежным индикатором техногенного воздействия. Высокое содержание хлоридов, не свойственное природным водам региона, скорее всего, связано с фильтрацией коммунально-бытовых стоков или противогололедных реагентов, используемых на дороге. Это демонстрирует антропогенный механизм формирования химического состава наледей.

Таким образом, питание наледей вдоль трассы ФАД «Лена» обеспечивается преимущественно подземными водами зон активного и затрудненного водообмена [6, 12], дренирующими как верхние горизонты четвертичных отложений, так и более глубокие трещиноватые коренные горные породы. Данное обстоятельство предопределяет

формирование устойчивого гидрокарбонатного состава наледей с вариативным катионным составом и минерализацией, закономерно изменяющейся в зависимости от степени водообмена и литологического состава водовмещающих пород [9, 11]. Пространственное расположение наледей и особенности их химического состава четко контролируются гидрогеологическими структурами, приуроченными преимущественно к зонам островного и прерывистого распространения ММП, где криогенная водоупорная роль мерзлой толщи минимальна и обеспечивается устойчивая разгрузка подземных вод. Выявленные закономерности полностью согласуются с фундаментальными положениями гидрогеологической школы Е.В. Пиннекера [9], обосновавшими ведущую роль структурно-гидрогеологического и геокриологического контроля в распространении, режима и генезисе наледей.

Исследование выполнено в рамках Программы фундаментальных научных исследований ИМЗ СО РАН № 126020516689-6 «Подземные воды криолитозоны, особенности их взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами».

Список литературы

1. Алексеев В.Р., Усов В.А. Влияние наледей на инженерные сооружения Амуро-Якутской магистрали // Материалы по мерзлотоведению Сибири и Дальнего Востока. Иркутск: 1964. С. 93–97.
2. Анисимова Н.П. Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск: Наука. 1981. 153 с.
3. Анисимова Н.П., Павлова Н.А. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео». 2014. 189 с.
4. Баишев Н.Е., Гагарин Л.А., Шепелев В.В. Применение индекса NDWI в исследовании природно-техногенных наледей на автодороге «Лена» (Южная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2024. Т. 29, № 3. С. 408–419.
5. Иванов А.В. Гидрогеохимические процессы при наледеобразовании. Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР. 1983. 108 с.
6. Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Дальневосточного федерального округа за 2024 год «Дальневосточный региональный центр государственного мониторинга состояния недр». Хабаровск. 2025. 307 с.
7. Карта мерзлотно-гидрогеологического районирования Восточной Сибири. Масштаб 1:2500000 / Под ред. П.И. Мельникова. М.: ГУГК. 1984. 4 л.
8. Петров В.Г. Наледи на Амурско-Якутской магистрали, с альбомом планов наледей. Л.: Изд-во АН СССР и НИАДИ НКПС СССР. 1930. 177 с.
9. Пигузова В.М., Шепелев В.В. Методика изучения наледей. Якутск: Изд-во ИМЗ СО АН СССР. 1975. 62 с.
10. Пиннекер Е.В., Писарский Б.И. Подземные воды зоны Байкало-Амурской магистрали. Новосибирск: Наука. 1977. 86 с.
11. Толстихин О.Н., Шепелев В.В., Пигузова В.М., Ломовцева Н.С., Мельников П.И. Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири. Новосибирск: Наука. 1984. 191 с.
12. Фотиев С.М. Подземные воды и мерзлые породы Южно-Якутского угленосного бассейна. М.: Наука. 1965. 230 с.
13. Lu Y., Yu W., Yi X., Han F., Chen L. Designing and numerical simulations of aufeis mitigation structure on cut-slope roadway // Cold Regions Science and Technology. 2017. Vol. 141. P. 201–208.
14. Turcotte B., Dubnick A., McKillop R. Icing and aufeis in cold regions II: consequences and mitigation // Canadian Journal of Civil Engineering. 2023. Vol. 51(2). P. 125–139.
15. Toniolo H., Stutzke J., Lai A., Youcha E., Tschetter T., Vas D., Keech J., Irving K. Antecedent conditions and damage caused by 2015 spring flooding on the Sagavanirktok River, Alaska // Journal of Cold Regions Engineering. 2017. Vol. 31(2): 05017001.

СОВРЕМЕННОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ НАЛЕДЕЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА АЛДАНО-ТИМПТОНСКОМ МЕЖДУРЕЧЬЕ

Гагарин Л.А., Николаева Е.С.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, gagarinleo@yandex.ru

Аннотация. С помощью дешифрирования космических снимков Landsat 5,8 за 2005–2025 гг. и расчета на их основе разностного снежного индекса NDSI были установлены границы и площади наледей Алдано-Тимптонского междуречья в Южной Якутии. Общее количество наледей составило 856, суммарная площадь 446.16 км². С помощью формулы Б.Л. Соколова рассчитан объем наледного льда в количестве 2187.3 км³. Основными факторами природной среды, контролирующими наледеобразование, являются климатический, геолого-структурный, геоморфологический и мерзлотно-гидрогеологический.

Ключевые слова: *наледы, подземные воды, NDSI, талики, многолетнемерзлые породы*

Abstract. Using the interpretation of Landsat 5,8 satellite images for the period 2005–2025 and the calculation of the Normalized Difference Snow Index (NDSI), the icings boundaries and areas in the Aldan–Timp-ton interfluvium in southern Yakutia were determined. A total of 856 icings were identified, with a combined area of 446.16 km². The volume of icing ice was calculated using B.L. Sokolov's formula and amounted to 2187.3 km³. The main environmental factors controlling icing formation are climatic, geological-structural, geomorphological, and permafrost-hydrogeological conditions.

Keywords: *icings, groundwater, NDSI, taliks, permafrost*

Наледи служат индикатором циркуляции подземных вод в криолитозоне. Одной из важнейших функций является перераспределение подземного и поверхностного стока в течение года [3, 4]. В области сплошного распространения многолетнемерзлых горных пород (ММП) по объему наледей проводят расчет естественных ресурсов подземных вод с учетом, что весь их разгружающийся объем тратится на образование наледей. В области прерывистого и островного распространения ММП часть подземного стока зимой фиксируется в наледях, другая часть уходит транзитом по сети различного типа таликов. Тем не менее по объему наледного льда на таких территориях можно судить о минимальной величине естественных ресурсов.

Алдано-Тимптонское междуречье расположено в Южной Якутии. В зависимости от ландшафтных условий ММП здесь имеют прерывистое, местами островное, распространение. Как правило, многолетнемерзлые породы залегают в днищах речных долин, на их склонах северной экспозиции и высоком поясе гор (гольцовый пояс). Азонально их сплошность нарушается в местах развития тектонических разломов, которые выводят к дневной поверхности подземные воды глубокой циркуляции. Комплекс геолого-структурных, геоморфологических и климатических условий территории обеспечивает существование радиационно-тепловых таликов, широко развитых на плоских водоразделах, например Чульманского плоскогорья. Таликами также покрыты склоны речных долин южной экспозиции. Таким образом, на территории Алдано-Тимптонского междуречья созданы благоприятные условия питания подземных вод. Мощность ММП изменяется от 50 до 200 м, а их средняя годовая температура на подошве слоя годовых теплооборотов варьируется в диапазоне от 0 до –2.5 °С [6].

Согласно мерзлотно-гидрогеологическому районированию Восточной Сибири и Дальнего Востока Алдано-Тимптонское междуречье находится в пределах Алдано-Тимптонского гидрогеологического массива (западная и южная часть), Сутамо-Суннангинского гидрогеологического массива (восточная часть) и в северной части Юхтино-Чллымахского артезианского бассейна, входящего в состав Лено-Амгинского артезианского бассейна [2]. Подземные воды последнего являются пластово-карстовыми, трещинно-карстовыми и залегают под толщей многолетнемерзлых горных пород. По химическому составу они пресные, гидрокарбонатного кальциевого и кальциево-магниевого состава с минерализацией 0.2–0.3 г/дм³. Воды гидрогеологических массивов трещинные, пластово-трещинные, трещинно-жильные. По химическому составу воды гидрокарбонатные натриевые

и кальциево-натриевые с минерализацией до 0.3 г/дм^3 , известны трещинно-жильные воды с сульфатным кальциевым составом с минерализацией до 3 г/дм^3 и температурой воды в роднике до 10°C [6]. В зависимости от залегания по отношению к многолетнемерзлым породам подземные воды имеют напорный и безнапорный режим фильтрации. Зимой на участках разгрузки подземных вод, как правило, формируются наледи. Последние расположены преимущественно в днищах речных долин, у подножия склонов, на речных террасах.

Исследование наледей описываемого района проводится с 20-х гг. прошлого столетия. Изучением закономерностей их распространения и развития в разные годы занимались Н.А. Вельмина, С.Е. Суходольский, В.Р. Алексеев, С.М. Фотиев, Н.Н. Романовский, Б.Л. Соколов, В.В. Шепелев, С.Н. Булдович, А.В. Гаврилов, А.В. Бойцов и др.

Последние обобщающие работы по наледям Алдано-Тимптонского междуречья проводились в 70-х гг. XX в. коллективом якутской экспедиции кафедры мерзлотоведения МГУ в рамках мелко-, среднемасштабных мерзлотно-гидрогеологических и инженерно-геологических съемок [5]. По данным этих исследований было идентифицировано 827 наледей суммарной площадью 131.62 км^2 и объемом 242.9 км^3 . Относительная наледность речных бассейнов исследуемой территории варьируется в широких пределах – от 0.03 до 2.72 %. Установлено, что относительная наледность зависит от геолого-структурных, геоморфологических и мерзлотно-гидрогеологических условий района. Распределению наледей свойственна высотная поясность. Так, в пределах Чульманского артезианского бассейна с абсолютной высотой водоразделов в диапазоне 750–950 м наибольшее количество наледей фиксировалось на отметках 700–900 м. В области Алданского гидрогеологического массива водоразделы достигают высоты 800–1300 м, с концентрацией наледей на отметках 900–1100 м.

В настоящее время в условиях изменения климата становится актуальным вопрос изменчивости мерзлотно-гидрогеологических условий территории Алдано-Тимптонского междуречья под воздействием природных и антропогенных факторов. Один из наиболее чувствительных показателей этих условий – наледи. В связи с этим целью исследования стала оценка современного распространения наледей Алдано-Тимптонского междуречья и их морфометрических параметров.

Для установления местоположения наледей выполнено дешифрирование космических мультиспектральных снимков Landsat 5, 8 за период съемки с конца апреля по начало июня с 2005 по 2025 г. Интерпретация снимков проведена в полуавтоматическом режиме в программе Arcgis 11.4 с помощью расчета разностного снежного индекса (NDSI). Выбранные периоды съемки позволяют отчетливо получить пространственные размеры наледей, так как их размеры в это время максимальны, а снежный покров уже стаивает. Таким образом были получены максимальные размеры наледей за сезон. Стоит отметить, что дешифрирование осложнялось облачностью на изображениях, которая в отдельные годы покрывала поверхность Земли в течение всей весны. Также в силу воздействия различных факторов наледообразования не все наледи формировались из года в год.

Для расчета объемов наледного льда применялась эмпирическая формула Б.Л. Соколова [3], связывающая площадь и объем наледи на момент ее максимального роста по формуле (1):

$$W = aF^n, \quad (1)$$

где W – объем наледи, F – площадь наледи, a и n – эмпирические коэффициенты, равные 0.894 и 1.118 соответственно для Алдано-Тимптонского междуречья [1].

По результатам дешифрирования наледей Алдано-Тимптонского междуречья (рисунок) было идентифицировано 856 наледей суммарной площадью 446.16 км^2 . Большая их часть сконцентрирована в интервалах высот 720–780 м. Наледный пояс расположен в диапазоне абсолютных отметок 260–1280 м.

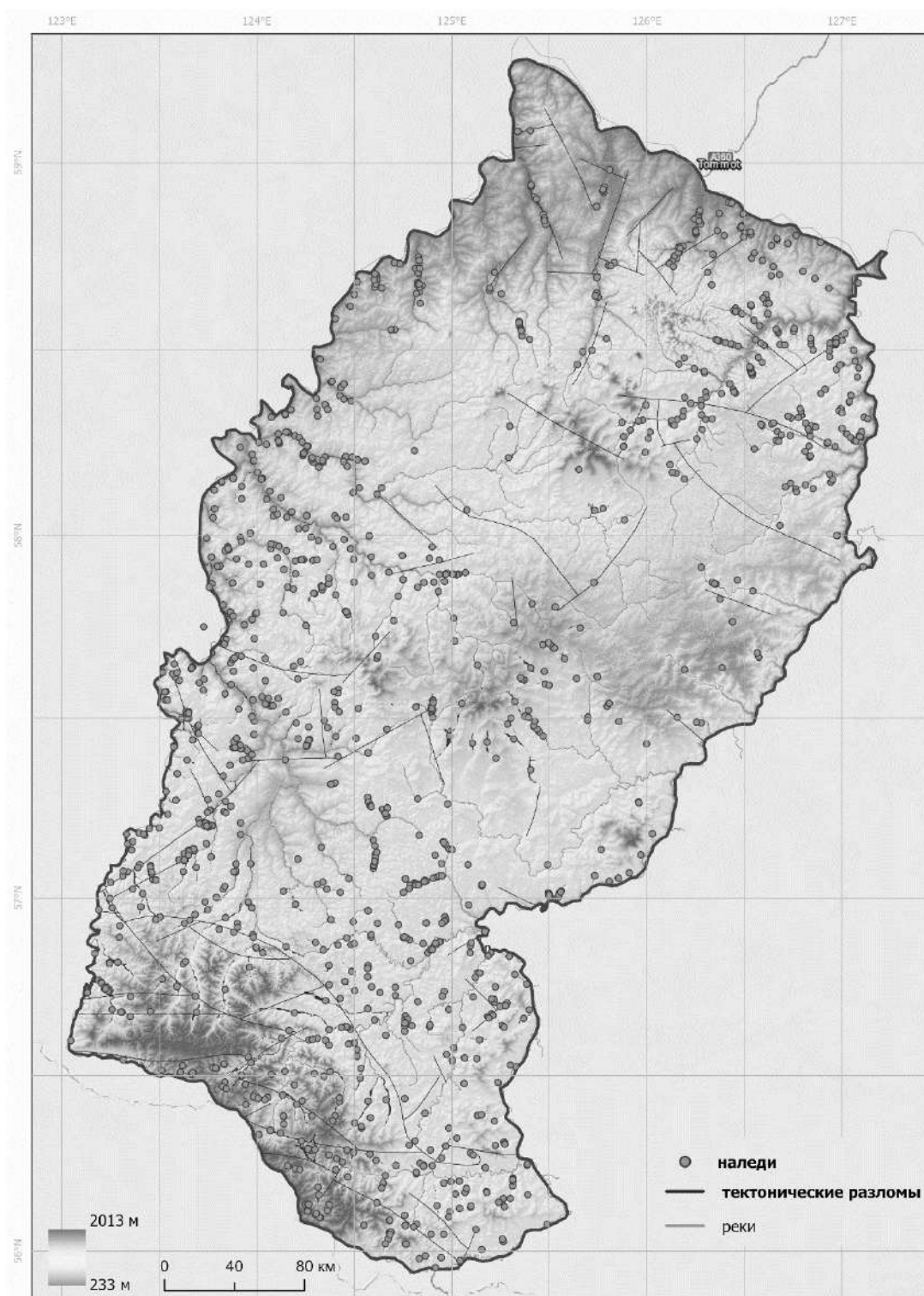


Схема распространения наледей на Алдан-Тимптонском междуречье.

Полученные данные отражают суммарное количество наледей, появившееся с 2005 по 2025 г. и их максимальную площадь за все годы. В разные годы эти величины отличаются друг от друга значительно, что связано с изменчивостью наледного питания и условий их формирования. Тем не менее нам представляется возможным оценить прогнозные ресурсы подземных вод в исследуемом регионе. Так, подставляя суммарную площадь наледей Алдано-Тимптонского междуречья 446.16 км^2 в формулу (1), получим объем наледного льда в размере 2187.3 км^3 . В сравнении с данными, полученными в 70-х гг. прошлого столетия [5], объем наледного льда выше в 9 раз. В дальнейшем планируется провести расчеты мофрометрических параметров по отдельным годам с 2005 по 2025 г. для возможности их сравнения за

полувековой период времени. Для выявления роли факторов наледообразования и их количественной оценки будут проанализированы метеорологические параметры по данным метеостанций в регионе, а также многолетний уровенный режим подземных вод.

Работа выполнена в рамках Базового проекта № 126020516689-6.

Список литературы

1. Марков М.Л. Наледи зоны БАМ: экспедиционные исследования. СПб.: Нестор-История, 2017. 319 с.
2. Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири. Новосибирск: Наука, 1984. 190 с.
3. Соколов Б.Л. Наледи и речной сток. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 190 с.
4. Толстихин О.Н. Наледи и подземные воды северо-востока СССР. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1974. 164 с.
5. Экзогенные геологические процессы и явления: Южная Якутия. М.: Изд-во МГУ, 1980. 227 с.
6. Южная Якутия: Мерзлотно-гидрогеологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. 444 с.

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ БАССЕЙНА РЕКИ НЕРА В ОЙМЯКОНСКОМ РАЙОНЕ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Гайдукевич В.А., Павлова Н.А., Полубелова А.В.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, gaydukevich.83@bk.ru

Аннотация. В докладе рассмотрены гидрогеологические условия долины реки Нера – самого крупного притока р. Индигирка. Для этого собраны и проанализированы фондовые материалы и результаты поисково-оценочных работ, полученные с участием авторского коллектива на двух месторождениях подземных вод. Река Нера имеет сезонный сток. Выявлено, что водовмещающие породы в талике под р. Нера обладают хорошими фильтрационными свойствами, увеличивающимися по течению реки. Это способствует быстрому восполнению запасов подземных вод, сработанных зимой. Синхронные изменения уровня воды в скважинах и р. Неры, близкий химический состав подземных и речных вод указывают на их тесную гидравлическую связь. Использование изучаемых подземных вод в качестве источника питьевого водоснабжения возможно только после проведения водоподготовки из-за повышенного содержания железа и марганца.

Ключевые слова: Яно-Колымский криогенно-напорный бассейн, подрусловой талик, река Нера, уровень воды, химический состав

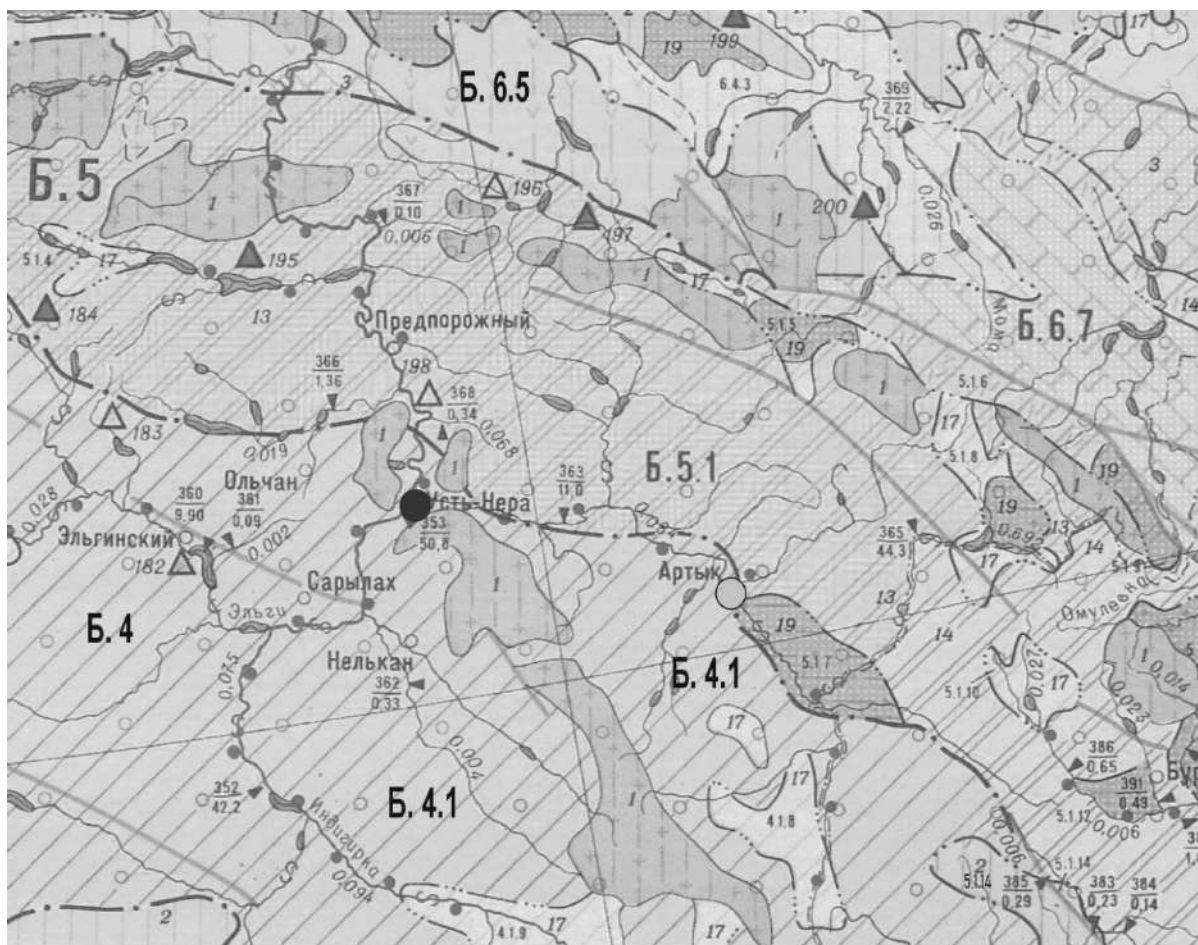
Annotation. This article examines the hydrogeological conditions of the Nera River valley, the largest tributary of the Indigirka River. In order to accomplish this, fond data and surveying results obtained with the participation of the authors at two groundwater deposits were collected and analyzed. The Nera river has a seasonal flow. It was determined that the rocks of the Nera river talik have great permeability, which increases downstream. This contributes to the quick replenishing of groundwater reserves which are depleted during winter. Synchronous changes in the water levels of the wells and the Nera river, as well as their similar chemical compositions, show that the wells and the river have a close hydraulic connection. This groundwater can be used as drinking water only after undergoing treatment due to elevated content of iron and magnesium and, less commonly, of aluminum and lithium.

Keywords: Yana-Kolymsky cryogenic artesian basin, river talik, Nera river, water level, chemical composition

В северных районах Республики Саха (Якутия) острой проблемой является надежное обеспечение водой населения и промышленных объектов. Использование речных вод для водоснабжения затруднено из-за сезонности существования поверхностного стока и низкого качества воды. Регионально распространенные подмерзлотные воды, как правило, мало изучены, особенно в труднодоступных районах. В этих условиях альтернативным вариантом водоснабжения могут быть таликовые воды, расположенные под днищами долин крупных водотоков. Целью исследований являлось изучение формирования ресурсов подземных вод в долине р. Нера вблизи наиболее крупных населенных пунктов Оймяконского района Республики Саха (Якутия). Изучение особенностей режима подземных вод пойменного талика, химического состава поверхностных и подземных вод проводилось в приустьевой части р. Нера (пос. Усть-Нера) и на расстоянии 146 км выше по течению реки (с. Артык). Для этого использованы материалы АО «Якутскгеология», полученные с участием авторского коллектива в 2010–2013 гг., на основании которых были оценены запасы Усть-Нерского и Артыкского месторождений питьевых подземных вод (МППВ), а также привлечены фондовые данные Института мерзлотоведения СО РАН и опубликованная литература.

Рассматриваемая территория расположена в пределах Нерского плоскогорья с абсолютными отметками 1000–1300 м, между Оймяконским нагорьем и хребтом Черского. Характерной особенностью климата района является его континентальность. Продолжительность зимнего периода 8 месяцев (сентябрь – май). Средняя годовая температура воздуха составляет $-15...-17^{\circ}\text{C}$ при диапазоне годовых колебаний $90-106^{\circ}\text{C}$. Самый холодный месяц – январь ($-55...-65^{\circ}\text{C}$), самый теплый – июль ($28-30^{\circ}\text{C}$). Количество атмосферных осадков незначительное (230–240 мм в год). Распределение их в течение года неравномерное и основное количество приходится на летнее время. В гидрогеологическом отношении район расположен в пределах Яно-Индигирского криогенного напорного бассейна (КНБ), являющегося частью Яно-Колымского КНБ, со сплошным распространением многолетнемерзлых пород мощностью 100 – 500 м (рисунок) [1, 5].

В геологическом строении территории принимают участие триасовые отложения верхоянского геосинклинального осадочного комплекса, перекрытые по долинам рек Индигирка и Нера четвертичными образованиями.



Условные обозначения

Б.4 Яно-Колымский КНБ
 Б.4.1 Яно-Индигирский КНБ
 Б.4.1.8 Одонсканский КГБ
 Б.5 Иньяли Дебенский АДАБ
 Б.5.1 Собственно Иньяли Дебинский АДАБ
 Б.5.1.5 Бугхчанский КГБ
 Б.5.1.6 Дарпский АДАБ
 Б.5.1.7 Верхненерский АБ
 Б.5.1.8 Деллянкирский КГБ

Участок исследований
 ● Усть-Нерское МППВ
 ○ Артыкское МППВ

Б.5.1.9 Дарпский АБ
 Б.5.1.10 Верхнеберелехский КГБ
 Б.5.1.14 Аркогалинский КАБ
 Б.6 Полускенско-Верхнеколымский ГТМ
 Б.6.4.3 Верхнемомский КГБ
 Б.6.5 ГТМ Черского
 Б.6.7 Омудевский ГТБ

Фрагмент Карты мерзлотно-гидрогеологического районирования Восточной Сибири масштаб 1:2 500 000 [4].

Протяженность р. Нера – 331 км. Площадь ее водосбора 22 300 км² [2]. Долина реки корытообразная асимметричная с более пологим и террасированным левым склоном. Ширина ее 3 – 4 км, а ширина поймы до 0.8 км. Русло реки сильно меандрирует и разбивается на ряд протоков и рукавов, ширина русла изменчива и в среднем составляет 200 м. Уклон дна долины р. Нера между изучаемыми участками – 0.001.

Режим р. Нера и подземных вод талика под ней непостоянен и определяется климатическими факторами и наличием многолетнемерзлых пород. Основным источником питания водотока являются талые воды в весенний период и дождевые воды в летнее время. Во время весеннего половодья (конец мая) рост уровня воды в реке достигает в ее среднем

течении 2.7 м, а в приустьевой части – 4.1 м [2]. В октябре начинается промерзание речного стока, в период с декабря по май сток на реке отсутствует. Среднеголетний расход воды составляет 118 м³/с. Речные воды по химическому составу гидрокарбонатно-сульфатные магниевые-кальциевые весьма пресные с минерализацией 0.1 г/дм³.

Под руслом и на пойме р. Нера распространен локально-водоносный криогенно-таликовый комплекс современных четвертичных – верхнетриасовых отложений.

В устье р. Нера мощность четвертичных валунно-галечниковых отложений достигает 20 м [3]. Подстилающие их породы триасового возраста представлены окремненными песчаниками и окварцованными алевролитами. Подрусловые воды Усть-Нерского месторождения вскрыты тремя скважинами. Глубинность изучения геологического разреза составила 25 м. Скважины пробурены перпендикулярно руслу реки. Две скважины, расположенные в 12 и 27 м от русла реки, вскрыли подземные воды с глубины 1 м и из талых пород не вышли. В 100 м от этих скважин подземные воды вскрыты в интервале 3.8 – 13.6 м. Глубже залегают многолетнемерзлые породы. Подземные воды безнапорные. При опытных откачках с дебитом от 2.1 до 6.7 л/с понижение уровня подземных вод не превышало 2.0 м. Водовмещающие отложения подруслового талика обладают хорошими фильтрационными свойствами и большой водообильностью. Это подтверждается высокими значениями коэффициента водопроницаемости пород (223 – 296 м²/сут) и удельного дебита скважин (2.0–3.4 л/с).

По химическому составу подземные воды пойменного талика вблизи устья р. Нера гидрокарбонатно-сульфатные магниевые-кальциевые весьма пресные (минерализация до 0.1 г/дм³). Их качество не соответствует требованиям, предъявляемым к питьевым водам по содержанию железа и марганца. Запасы подземных вод на Усть-Нерском месторождении оценены по категории С₁, в объеме 3000 м³/сут. В настоящее время месторождение не разрабатывается.

На Артыкском месторождении таликовые воды впервые изучались в 1970 г. Глубина скважин, пробуренных в этот период, определялась мощностью аллювия и не превышала 7.3 м. В зимний период подземные воды были вскрыты с глубины 4.1 – 4.7 м. В 2012 – 2013 гг. были пробурены две скважины глубиной 20 м, расположенные на низкой пойме реки. Ими вскрыты подземные воды непосредственно подо льдом реки в четвертичных валунно-галечниковых отложениях в интервале глубин 2.0 – 3.0 м, а также в триасовых песчаниках и алевролитах в интервале 10.5 – 20.0 м. Водоносные горизонты отделены друг от друга многолетнемерзлыми породами. Зимой подземные воды обладают напором, их уровень при бурении скважин установился на 0.25 м ниже поверхности речного льда. В процессе опытно-фильтрационных опробований при дебите откачек от 2.8 до 3.1 л/с достигнуты понижения уровня подземных вод 11.31 и 10.24 м соответственно. Значения коэффициента водопроницаемости водоносного пласта составили от 62 до 93 м²/сут, а удельный дебит скважин – 0.3 л/с·м.

Под р. Нера вблизи с. Артык в 1954 г. построена каптажная галерея, из которой проводится забор воды до настоящего времени. По данным режимных наблюдений за уровнем подземных вод в ней, зимой в период отсутствия речного стока на р. Нера верхняя часть пойменного талика осушается до глубины 3.4 м. В весенний период при интенсивном снеготаянии сработанные зимой запасы воды в талике полностью восполняются. В течение лета уровни подземных и речных вод имеют близкие абсолютные отметки и испытывают синхронные колебания в зависимости от количества выпадающих атмосферных осадков.

В районе с. Артык химический состав подземных вод талика сульфатно-гидрокарбонатный натриево-кальциево-магниевый, воды весьма пресные с минерализацией 0.1 г/дм³. Их качество не соответствует требованиям, предъявляемым к питьевым водам по содержанию железа. Запасы подземных вод на Артыкском МППВ оценены по категории С₁, в объеме 193 м³/сут. Месторождение пока в эксплуатацию не введено.

Таким образом, в начале зимнего периода происходит промерзание р. Нера, и в дальнейшем до начала половодья сток в реке отсутствует. Особенности гидрологического

режима сказываются на гидродинамическом режиме подземных вод талика. Зимой верхняя часть талика осушается. В половодье происходит быстрое восполнение запасов подземных вод в талике за счет талых снеговых и речных вод. Этому способствуют высокие фильтрационные свойства подрусловых отложений. В летний период ход изменения уровней поверхностных и подземных вод практически идентичен и регулируется количеством выпавших атмосферных осадков. Химический состав поверхностных и таликовых вод аналогичен, что также указывает на их тесную взаимосвязь. Использование подземных вод подрусловых и пойменных таликов в долине р. Нера в качестве источника питьевого водоснабжения возможно только после проведения водоподготовки.

Список литературы

1. Гидрогеология СССР, Т. 20. Якутская АССР. М.: Изд-во «Недра», 1970. 384 с.
2. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. РСФСР. Вып. 16. Бассейны реки Лены (среднее и нижнее течение), Хатанги, Анабара, Оленека, Яны, Индигирки. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 595 с.
3. Гричук М.П. Палеогеографические материалы по разрезу аллювиальных отложений в устье р. Нера и их стратиграфическое положение // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 1979. № 49. С. 49–62.
4. Карта мерзлотно-гидрогеологического районирования Восточной Сибири масштаба 1:2 500 000 / гл. редактор Мельников П.И. М.: ГУГК, 1984.
5. Шепелев В.В., Толстихин О.Н., Пигузова В.М., Никитина Н.М., Ломовцева Н.С., Иванова Л.Д., Некрасов И.А. Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. 190 с.

РОЛЬ СЕЗОННОТАЛОГО СЛОЯ В ФОРМИРОВАНИИ СТОКА ГОРНЫХ РЕК СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ В ПЕРИОД ЗИМНЕЙ МЕЖЕНИ

Глотов В.Е., Ушаков М.В.

Северо-Восточный комплексный НИИ ДВО РАН, Магадан, geocol@neisri.ru

Аннотация. Установлено, что в начале холодного периода года при промерзании водоносного сезонноталого слоя продолжается оттаивание льдистой подошвы слоя. Этот процесс осуществляется с участием тепла, выделяемого при переходе воды из жидкого состояния в твердое на границе промерзающего слоя с водоносным. Талая вода участвует в питании речного стока, что подтверждается наблюдениями за изотопным составом речных вод в нижнем течении р. Колымы.

Ключевые слова: *северо-восток России, горные водотоки, многолетнемерзлые породы, сезонноталый слой, речной сток, зимняя межень, зимнее истощение стока*

Abstract. It has been established that at the beginning of the cold season, when the seasonally thawed aquifer freezes, the ice cap of the layer continues to thaw. This process involves heat released during the transition of water from a liquid to a solid state at the boundary of the frozen layer and the aquifer. Meltwater contributes to river runoff, which is confirmed by observations of the isotopic composition of river waters in the lower reaches of the Kolyma River.

Keywords: *Northeast Russia, mountain streams, seasonally thawed layer, river runoff, winter low water, winter runoff depletion*

Северо-восток Российской Федерации (СВ РФ) известен как преимущественно горная территория с повсеместным распространением многолетнемерзлых пород (ММП). Густота речной сети региона 0.87 км/км^2 [9]. Питание речного стока обеспечивается в основном выпадением дождей, таянием снега и наледей, разгрузкой подземных вод речных таликов и сезонноталого слоя (СТС). Роль последнего недооценивается, хотя фактически очень велика. Так, по данным Колымской воднобалансовой станции (КВБС), при достижении глубины сезонного оттаивания СТС на горных склонах более 20 см практически весь склоновый сток трансформируется в подземный, даже при обильных продолжительных дождях [6], т. е. этот слой реально влияет на режим речного стока.

В процессах формирования подземных вод, наряду с инфильтрацией, участвует конденсация в СТС атмосферных водяных паров [8], таяние подземных льдов [1, 2, 14, 15]. С наступлением холодного периода года все эти процессы прекращаются. В верхнем поясе, охватывающем водоразделы в зоне климата арктической пустыни и арктической тундры (гольцовый пояс), в которой СТС в крупнообломочных отложениях достигает 4–5 м, с наступлением холодного периода года слой осушается в течение нескольких суток. Промерзание его происходит как от подошвы, так и с поверхности. При весеннем таянии снега талая вода проникает в охлажденный слой, замерзает, формируя гольцовый лед, включая ледяные линзы и жилы в трещинах зоны гипергенеза.

Ниже гольцового пояса водоносный СТС представлен преимущественно элювиально-делювиальными, делювиальными крупнообломочными образованиями мощностью до 3–4, реже до 6 м. В составе заполнителя обычно присутствует песок разноразмерный, супесь, суглинки, иногда глина. Замечено, что на горных склонах площадей, в тектоническом отношении представленных террейнами, сформировавшихся в зонах схождения литосферных плит, в составе заполнителей крупнообломочных образований преобладают грунты пылеватых и глинистых фракций. На террейнах, пассивных в геодинамическом отношении, сформировавшихся на окраинах континентальных плит, заполнители представлены песчаными фракциями, иногда с примесью более тонких. Это определяет распространенность льдистых глинистых грунтов на горных склонах и плоских водоразделах на площадях геодинамически активных террейнов, в то время как в пределах относительно геодинамически пассивных на склонах гор при промерзании формируются сушенцы, т. е. промерзающие безводные грунты. С началом весеннего снеготаяния часть талой воды здесь расходуется на формирование гольцовых льдов.

Третий (нижний) пояс распространения водоносного СТС охватывает приподошвенные части склонов и днища долин поверхностных водотоков. Водовмещающими являются отложения аллювиального, делювиального, ледникового, пролювиального происхождения. Состав образований – галька, гравий, валуны. Состав заполнителя – пески, супеси, суглинки, глины. Замечена и связь, отмеченная выше, гранулометрического состава с геодинамической природой дренируемого рельефа, описанная, например, в объяснительных записках к листам геологических карт м-ба 1:200 000. Так, авторы работы [7], характеризуя состав четвертичных отложений на площади листа Р-55-XX, отмечают, что на участке фрагмента Иньяли-Дебинского синклинория (геодинамически активного рельефа), в долине нижнего течения р. Дебин, в составе делювиальных, пролювиальных и аллювиальных отложений распространены несортированные щебень, дресва, галька с песком глинистым, суглинком, глинами. На участке Аян-Юрхского антиклинория (Вилигинский задуговый рельеф, сформированный на континентальной окраине), в составе рыхлых четвертичных отложений отмечены галечники, щебень, гравий и пески при отсутствии глинистого материала. Соответственно, коэффициент фильтрации грунтов, слагающих СТС на геодинамически активных рельефах, до 50–60 м/сут, на рельефах геодинамически пассивных – до 200–210 м/сут, редко больше. Мощность водоносного СТС от 1–2 до 4.5–5.5 м в долинах, сложенных крупногалечными аллювиальными отложениями.

В зависимости от состава многолетнемерзлой подошвы водоносного СТС, промерзание его происходит по разным схемам. Но во всех случаях в процессе промерзания участвует вода, которая при переходе в кристаллическую форму производит тепло в 330 КДж/кг. Вода в прилегающем слое нагревается, и плотность ее возрастает от 999.8337 кг/м³ при 0 °С до 999.8401 кг/м³ при +0.1 °С [10]. В слабопроницаемых породах тепло замедляет промерзание грунтов. Оттаивание этих грунтов происходит медленно до начала холодного периода. С началом холодного периода промерзание происходит как сверху от дневной поверхности, так и снизу от подошвы СТС.

В сезонно-талых хорошо водопроницаемых отложениях, залегающих на мерзлых льдистых грунтах, более плотная вода от фронта промерзания опускается вниз, способствуя оттаиванию льдистой подошвы. В таких водоносных, обычно гравийно-галечных, отложениях, залегающих на льдистых образованиях, повышение глубины сезонного оттаивания происходит и после наступления холодного периода года. По наблюдениям в долине руч. Контактного, в гидрометеорологическом створе «Нижний» оттаивание льдистых галечников продолжалось до конца января, а в отдельные годы – до конца февраля [5]. Вода, образовавшаяся при оттаивании, участвует в питании водотоков в зимнюю межень (рисунок).

Этот факт питания водотоков бассейна Верхней Колымы талыми водами в начале зимней межени отмечен нами [4]. Мы видим их и в материалах наблюдений И.В. Токарева в 2013–2014 гг. за изменениями изотопного состава воды в нижнем течении р. Колымы в районе пос. Черский [11]. Он установил облегчение изотопного состава в мае – июне, связанное с массовым таянием снежного покрова, в августе – в связи с выпадением обильных дождей и в конце сентября – в октябре – в начале зимней межени. Последнее мы увязываем с питанием водотоков в бассейне стока р. Колымы водой от таяния льда в составе аллювиальных отложений после наступления холодного периода времени.

Определить долю этого питания можно с использованием работ М.В. Ушакова по оценке длительности стока промерзающих водотоков [12, 13]. Обработав материалы многолетних наблюдений за стоком рек СВ РФ, он пришел к выводу, что кривые истощения в зимнюю межень хорошо аппроксимируются логарифмической функцией:

$$Q_i = a \cdot Q_k \cdot \ln(i/D_f), \quad (1)$$

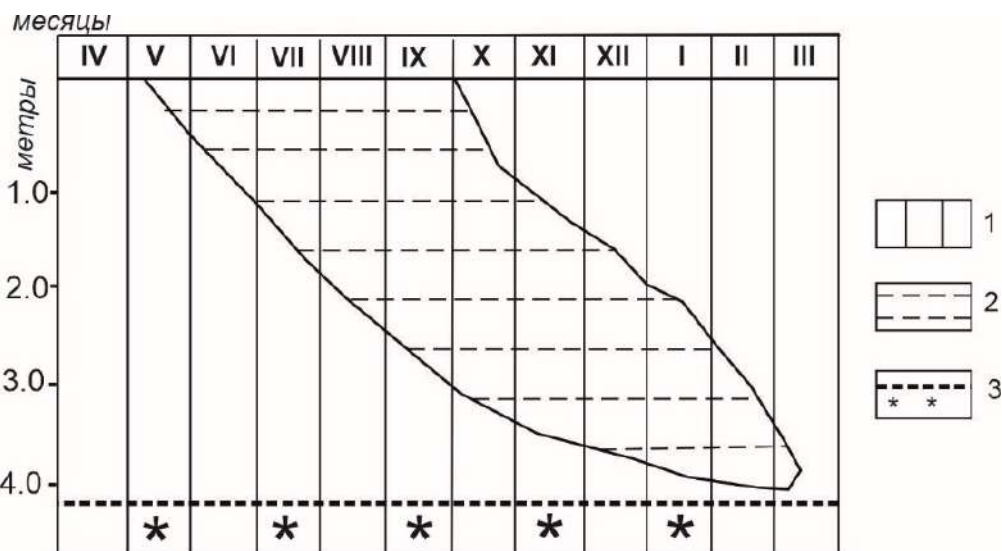


Схема оттаивания и промерзания СТС в ледяных галечниках долины водотока (по материалам КВБС) [5]: 1 – сезонно-талые образования; 2 – то же, водонесные при оттаивании; 3 – граница многолетнемерзлых и сезонно-талых ледяных пород.

где Q_k – расход воды на 1 октября (средняя дата начала зимней межени); Q_i – расход воды в i -день межени, отсчитывая от 1 октября; a – коэффициент, отражающий ресурсы подземных вод СТС и таликов на водосборной площади водотока, аппроксимируется формулой:

$$a = 0.654(\lg Q_{IX} + 1)^{0.0842}, \quad (2)$$

где Q_{IX} – средний месячный сток за сентябрь. Коэффициент детерминации формулы $R^2 = 0.93$.

Кривая истощения стока по формуле (1) отражает сработку ресурсов подземных вод, накопленных в водоносных горизонтах до начала холодного периода времени (в среднем 1.X). На этот же график выносят реальную кривую, построенную по данным измерений стока. Как правило, эта кривая находится выше расчетной. Площадь между ними мы принимаем за объем стока, сформированного дополнительными источниками подземной воды, которыми являются льды, оттаивающие после начала сезонного перемерзания СТС. По нашим ориентировочным подсчетам объем стока тающего льда составляет около 15–20 % водного стока в начале зимней межени.

Таким образом, в зимнюю межень при оценке общих ресурсов подземных вод, питающих реки, следует учитывать и воды тающей льдонасыщенной части СТС. Проявляется связь объема этого питания с геодинамической активностью дренируемых водотоками террейнов, которая прослежена по величине стока водотоков водосбора Верхней Колымы в начале зимней межени [4] и длительности их промерзания, которая минимальна на площади Иньяли-Дебинского геодинамически активного террейна [3]. Практическая значимость выявляемого дополнительного источника питания подземных вод и водотоков в зимнюю межень состоит в возможности создания технически осуществимого способа увеличения емкости ледяного основания СТС, вызывающего рост запасов пресных подземных вод.

Список литературы

1. Алексеев В.Р., Бояринцев Е.А., Галченко Е.Д. и др. Механизмы криогенного регулирования стока в формировании водного баланса малых горных рек зоны многолетнемерзлых пород // Украинский гидрометеорологический журнал. 2011. № 8. С. 182–189.
2. Банценкина Б.Т. Динамика ледистости крупнообломочных склоновых отложений в период весеннего снеготаяния // Колыма. 2001. № 2. С. 28–31.
3. Глов В.Е. Неоднородности стока малых горных водотоков бассейна Верхней Колымы в начале зимней межени // Криосфера Земли. 2025. Т. XXIX. № 4. С. 37–49.
4. Глов В.Е., Глова Л.П., Ушаков М.В. Тектонический контроль ледового режима водотоков Верхней Колымы // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2017. № 3, С. 31–40.
5. Замолотчикова С.А., Зуев И.А. Юкагино-Анжуйский и Колымский регионы // Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток. Под ред. Э.Д. Ершова-М.: Недра. 1989. С. 293–312.

6. Кузнецов А.С., Насыбулин Ш.С. Особенности формирования стока на реках Верхней Колымы // Сб. работ Магаданской гидромет. обсерватории. Магадан: Мат-лы КУГМС. 1973. Вып. 3. С. 52–65.
7. Мальков Б.И., Абельс Е.Г. Объяснительная записка к Государственной геологической карте М. 1:200000. Лист Р-56-XX. М.: Копиров.-картограф. предприятие ВГФ. 1976. 117 с.
8. Рейнюк И.Т. Конденсация в деятельном слое вечной мерзлоты. Труды ВНИИ-1. Мерзлотоведение. Вып. 1. Магадан: ВНИИ-1, 1959. 24 с.
9. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 19. Северо-Восток. Л.: Гидрометиздат, 1969. 282 с.
10. Свойства материалов и веществ. Вода и водяной пар. Вып. 1. Таблицы стандартных справочных данных. М.: Издат. стандартов. 1990. 158 с.
11. Токарев И.В. Изотопная реконструкция происхождения, эволюция и оценка текущего состояния водноледниковых объектов: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. СПб., 2025. 46 с.
12. Ушаков М.В. Истощение осенне-зимнего стока в ручьях криолитозоны (на примере ручьев Колымской воднобалансовой станции) // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2020. № 3. С. 22–25.
13. Ушаков М.В. Модель предвычисления ежедневных расходов воды осенне-зимней межени в бассейне р. Анадырь // Общество. Среда. Развитие. 2021. № 3, С. 112–124. DOI:10.53115/19975996_2021_03.
14. Шепелев В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск: ГЕО, 2011. 169 с.
15. Шепелев В.В. Анализ влияния криолитозоны на водообменные процессы // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44, № 2. С. 184–189.

ТЕКТОНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ АНАДЫРСКОГО НЕФТЕГАЗОНОСНОГО БАСЕЙНА

Глотов В.Е.

Северо-Восточный комплексный НИИ ДВО РАН, Магадан, geocol@neisri.ru

Аннотация. Анадырский нефтегазоносный бассейн (АНГБ) сформировался в позднемеловое – плейстоценовое время в зоне взаимодействия трех геодинамически разных раннемеловых террейнов. Эта особенность отразилась на ряде показателей толщи многолетнемерзлых пород (ММП), имеющих сплошное распространение. Наиболее низкие значения температуры яруса годовых теплооборотов (ЯГТО) и наибольшая мощность криолитозоны, наличие внутри- и подмерзлотных криопэгов свойственны осадочному чехлу над Златогорским террейном – фрагментом метаморфизованной палеозойско-мезозойской пассивной окраины. Наиболее высокая температура в подошве ЯГТО при меньшей мощности ММП и развитии локальных сквозных таликов под межморенными озерами и в руслах рек с постоянным круглогодичным стоком. Отсутствие криопэгов свойственно участкам, в пределах которых основание осадочного чехла представлено Майницким террейном – фрагментом раннемеловой островной дуги и Алькатваамским террейном аккреционной призмы.

Ключевые слова: *нефтегазоносный бассейн, террейн, фундамент бассейна, криолитозона, криопэги*

Abstract. The Anadyr oil and gas basin (AOGB) was formed in the Late Cretaceous-Pleistocene time in the zone of interaction of three geodynamically different Early Cretaceous terranes. This feature is reflected in a number of parameters of the permafrost layer, which is continuously distributed. The lowest temperatures of the active layer and the greatest permafrost zone thicknesses, along with the presence of intra- and subpermafrost cryopegs, are characteristic of the sedimentary cover above the Zlatogorsk terrane, which is a fragment of a metamorphosed Paleozoic-Mesozoic passive margin. The highest temperatures are found at the base of the active layer, with less permafrost thickness and the development of localized through taliks beneath intermoraine lakes and in river channels with constant year-round runoff. The absence of cryopegs is characteristic of areas within which the base of the sedimentary cover is represented by the Mainitsky terrane, which is a fragment of the Early Cretaceous island arc, and the Alcatvaam terrane of the accretionary prism.

Keywords: *oil and gas basins, terrane, cryolithozone, cryopegs*

Анадырский нефтегазоносный бассейн в геологическом отношении является постааккреционной впадиной, открытой в Берингово море. Он во второй половине XX в. привлек внимание как объект, перспективный для поисков нефти и газа [4]. Поисковые работы проводились с применением геологических и геофизических методов, бурением и опробованием скважин глубиной до 3500 м. Были выявлены два месторождения нефти и одно газовое [1, 5]. В начале 90-х гг. все полевые изыскания прекратились. Ликвидационные работы сопровождались утратой геологических архивов. Однако в текущем десятилетии восстановился интерес к проблеме поисков и разведки месторождений углеводородов. Новый импульс связан с активизацией перевозок грузов по Северному морскому пути, открытием и освоением новых крупных месторождений рудного золота, олова, меди, положительными результатами геофизических работ, выполняемыми ОАО «Дальморнефтегеофизика» [3].

Реализация планов на поиски, разведку и освоение как открытых, так и возможных месторождений нефти и газа связана со знанием особенностей гидрогеологии и геокриологии бассейна. Геолого-геохимические и гидрогеологические условия его предварительно были как обобщены в рукописном варианте [2], так и опубликованы в монографиях [6, 8, 9].

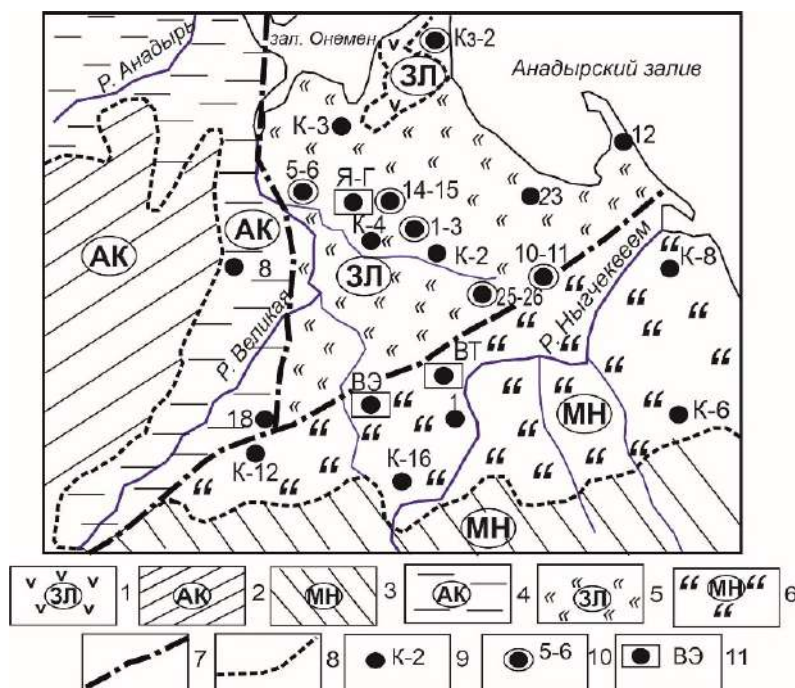
Вместе с тем геокриологические особенности изучены очень слабо. Сведения о глубине залегания и температуре толщи многолетнемерзлых пород (ММП) в глубоких скважинах содержались в основном в архивных материалах, поэтому мы поставили цель обобщить их, пользуясь личными данными, полученными в результате поисковых работ.

В геологическом отношении Анадырская впадина заложена в зоне взаимодействия трех геодинамически разных террейнов: Майницкого – фрагмента позднеюрско-раннемеловой островной дуги, Алькатваамского – фрагмента раннемеловой аккреционной призмы, Златогорского – фрагмента метаморфизованной палеозойско-мезозойской пассивной окраины [10]. Зона взаимодействия террейнов отмечена развитием глубоких впадин с мощностью осадочного чехла до 9–10 км. Осадочный чехол сложен породами терригенного, вулканогенно-осадочного, континентального и морского происхождения. В слоях верхнемелового (K₂sn),

палеогенового (Pg₁-Pg_{2mn}) возраста развиты пластовые тела диабазов, долеритов, андезит-базальтов и их туфов [8]. Это факт считался негативным с позиции оценки нефтегазоносности, поэтому часть Анадырского бассейна севернее Анадырского лимана относили к бесперспективной на нефть и газ площади (около 30 тыс. км²) и не включали в состав АНГБ. В настоящее время этот же факт можно рассматривать как позитивный для поисков возможных месторождений водорода [7].

Климат на площади АНГБ по данным метеостанции в г. Анадырь субарктический морской со среднегодовой температурой –5.1 °С, осадки 347 мм, длительность холодного периода года со среднесуточной температурой ниже 0 °С 230 дней.

Указанные геолого-тектонические особенности Анадырского бассейна, в сочетании с климатическими, предопределили его геокриологические особенности (рисунок).



Анадырский нефтегазоносный бассейн: 1–3 террейны, обрамляющие АНГБ: 1 – Златогорский (ЗЛ), 2 – Альтатваамский ((АК), 3 - Майницкий (МН); 4–6 террейны, перекрытые осадочным чехлом АНГБ (фундамент впадины): 4 – Альтатваамский, 5 – Златогорский, 6 – Майницкий; 7 – зона взаимодействия террейнов; 8 – граница АНГБ; 9 – одиночная скважина; 10 – группа скважин; 11 – установленные нефтегазовые месторождения: ВЭ – Верхне-Эчинское, ВТ – Верхне-Телекайское, ЯГ – Ягельное газовое.

Основной источник сведений о криолитозоне региона получен при электрокаротажных работах с выстойкой большинства скважин после бурения в течение 2-3 недель. Этого недостаточно для достоверных замеров температуры. Так, после двух недель в скважине 6 (рисунок) основание ММП отмечено на глубине 166 м. После десяти месяцев простоя пресная техническая вода в стволе скважины замерзла до глубины 216 м, поэтому в таблице мы привели данные по скважинам, которые по техническим причинам находились «в покое» более одного месяца.

Анализируя материалы геофизических исследований в скважинах и испытания водо-нефтегазоносных объектов, мы заметили связь показателей криолитозоны – глубины сезонного оттаивания, развития сквозных таликов, мощности криолитозоны и распространенности криопэггов – с тектонической природой основания осадочного мезокайнозойского чехла бассейна.

Сведения о многолетнемерзлых породах по репрезентативным скважинам в Анадырском нефтегазоносном бассейне

№ скважины на карте	Абсолютная отметка устья, м	Мощность ММП, м	Сведения о криопэгах	Геолого-тектоническая характеристика фундамента осадочного чехла
6	16.7	216	Подмерзлотная зона криопэгов. Два горизонта внутри мерзлоты	Зона взаимодействия Златогорского и Алякватваамского террейнов
15	47.15	145	Подмерзлотные криопэги, минерализация 15 г/дм ³	Зона взаимодействия Златогорского и Майницкого террейнов
26	61	80	Подмерзлотные воды пресные. Криопэги не выявлены	Прогиб в зоне взаимодействия Златогорского и Майницкого террейнов
ВЭ	160.3	86	Подмерзлотные воды пресные. Гидрогеологическая зональность прямая	Прогиб в зоне взаимодействия Майницкого и Златогорского террейнов
ВЭ	124	160	Криопэги не установлены	Там же
8	67.9	64	Подмерзлотные воды слабосоленые, на глубине солоноватые	На участке, проецируемом на Алякватваамский террейн

Участок впадины, проецируемый на Златогорский террейн, в настоящее время представляет собой слабовсхолмленную заболоченную низину с абсолютными отметками ниже 50 м. Сезонноталый слой (СТС) здесь обычно 0.5 м. В период казанцевского термохрона (135–105 тыс. л.н.) она была покрыта морскими водами. При бурении вскрывали криопэги как в толще ММП, так и ниже ее подошвы. Современная мощность ММП, вскрытая скважинами, 180–216 м, мощность охлажденных горизонтов (криопэгов) ниже подошвы ММП 50–60 м. При электрокаротаже в мерзлых породах фиксировали горизонты с криопэгами, разделенными глинистыми прослоями.

Температура пород в подошве яруса годовых теплооборотов (ЯГТО) вблизи морского побережья (скважина 12) составила –4 °С, по площади до –6 °С. Геотермический градиент в выдержанных более одного месяца скважинах 2.8–3.1 °С/100 м.

На участке впадины, проецируемой на Майницкий террейн, преобладает моренно-холмистый рельеф, понижения между холмами заняты заболоченными низинами. Абсолютные отметки поверхности до 170 м.

Холмы, покрытые зарослями кедрового стланика, сложены несортированным валунно-галечно-гравийным материалом с песчаным, супесчаным или суглинистым заполнителем, поэтому мощность СТС здесь достигает 2.5–3.0 м на холмах, на заболоченных низинах – до 0.5 м. Характерно развитие сквозных водопоглощающих таликов под озерами с глубиной 5–6 м и более. К концу зимнего периода подобные озера полностью дренируются и лед мощностью в 1.5–2 м ложится на высохшее дно. Это было зафиксировано нами при документации скважин сейсморазведочной партии [11]. ММП, вскрытые при бурении картировочных и нефтегазопроисловых скважин, имеют мощность до 150 м, вблизи непромерзающих рек – до 35 м (скважина 6). Температура подошвы ЯГТО от –3 до –5 °С. Геотермический градиент 1.5–2.4 °С/100 м.

В западном фрагменте АНГБ, примыкающем к хребту Рарыткин, фундамент представлен Алякватваамским террейном. Рельеф фрагмента выположен, с отметками поверхности от 25 до 70 м. Здесь пробурена только одна скважина (Р-8) глубиной 2404 м вблизи границы АНГБ. Рельеф большей части площади между хребтом Рарыткин и руслом р. Великой представлен левобережной поймой и надпойменными террасами, изобилующими руслами протоков, водотоков, озер. Мощность ММП, вскрытая скважиной, 64 м. Подземные воды по всему стволу скважины слабосоленые с минерализацией 1.2–8.0 г/дм³. По этим данным можно предположить активность водообменного процесса, предопределяющего существование водопоглощающих таликов в долинах рек, дренирующих Рарыткинский

хребет, и водовыводящих – в низовьях р. Великой. Эти факты могут свидетельствовать о значительных колебаниях мощности СТС – от минимальных значений на заболоченных участках (около 0.5 м) до нескольких метров вблизи водотоков и водоемов.

В заключение отметим, что Анадырский нефтегазоносный бассейн отличается большим разнообразием параметров толщи ММП – мощности, глубины сезонного протаивания, развития таликов, распространения криопэгов, температуры – в подошве ЯГТО. Учитывая сходство климатических условий по всей площади бассейна, можно сказать, что вышеуказанные различия определяются тектонической неоднородностью фундамента бассейна.

Список литературы

1. Агапитов Д.И., Агапитов Д.Д. Нефтегазоносные бассейны Чукотки (Анадырский и Хатырский бассейны) // Нефтегазоносные бассейны Западно-Тихоокеанского региона и сопредельных платформ: сравнительная геология, ресурсы и перспективы освоения. СПб.: ВНИГРИ, 1998. С. 213–219.
2. Агапитов Д.И., Иванов В.В., Глотов В.Е. и др. Отчет по теме: «Обобщение результатов буровых и геофизических работ в Анадырской впадине Чукотки», 1982. Магадан: Архив СВКНИИ. Анадырь: ТФГИ.
3. Большакова Н.В., Данильев С.М., Данильева Н.А. Ресурсный потенциал углеводородов и перспективы освоения шельфа Берингова моря Тихого океана и сопредельной территории Восточной Камчатки // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2020. Т. 15, № 4. С. 34–42. DOI: 10.17353/2070-5379/34-2020.
4. Брод И.О., Бурлин Ю.К., Васильев В.Г. и др. Известные возможные нефтегазоносные бассейны Дальнего Востока, северо-востока СССР и сопредельных территорий Якутии и Аляски // Проблемы Сибирской нефти. Новосибирск: СО АН СССР, 1961. С. 151–163.
5. Бурлин Ю.К., Карнюшина Е.Е., Свистунов Е.П., Донцов В.В. Состав и условия образования кайнозойских нефтегазоносных отложений Анадырского бассейна // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2008. № 1. С. 50–58.
6. Глотов В.Е. Гидрогеология осадочных бассейнов северо-востока России. Магадан: Кордис, 2009. 232 с.
7. Глотов В.Е. Особенности распространения и перспективы открытия скоплений водорода в газах подземных вод северо-востока России // Актуальные проблемы нефти и газа, 2023. Вып. 1(4). С. 40–45. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2023-40.art4.
8. Иванов В.В. Осадочные бассейны Северо-Восточной Азии. М.: Наука, 1985. 208 с.
9. Иванов В.В., Гревцев А. В., Щербань О. В. Седикахиты осадочных бассейнов Северо-Восточной Азии. М.: Наука, 1988. 168 с.
10. Ханчук А.И., Голозубов Н.А., Бялобжеский С.Г. и др. Кратоны и орогенные пояса востока России // Геодинамика, магматизм и металлогения востока России. Кн. 1. Владивосток: Дальнаука, 2006. С. 93–229.
11. Tregubov O.D., Glotov V.E., Konstantinov P.Yu. Hydrogeological Conditions of Drained Lake Basins of the Anadyr Lowland under Changing Climatic Conditions // Geography, Environment, Sustainability. 2021. N 4 (14). DOI: 10.24057/2071-9388-2021-30.

УРОВЕННЫЙ РЕЖИМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПОДРУСЛОВОГО ТАЛИКА В СРЕДНЕМ ТЕЧЕНИИ РЕКИ ЛЕНЫ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЯКУТИЯ)

Горохова Н.Б.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, xnb9@mail.ru

Аннотация. Подземные воды подруслового талика р. Лены – ключевой источник водоснабжения г. Якутска и прилегающих населенных пунктов. Для изучения особенностей формирования ресурсов подземных вод талика установлены датчики автоматической регистрации давления в двух скважинах, пробуренных в пойме р. Лены в районе с. Капитоновка и пос. Кангалассы. Измерения проводились в 2023–2025 гг. с периодичностью 3 и 12 часов. Результаты наблюдений показали, что подъем уровня воды в скважинах запаздывает на 10–13 дней от начала половодья на р. Лене. Минимальный уровень подземных и поверхностных вод фиксируется в апреле, максимальный – в летние месяцы и обусловлен снеготаянием и дождями. Отмечается сезонная и пространственная изменчивость химического состава воды в р. Лене и в изучаемых водоносных комплексах. Полученные данные подтверждают высокую зависимость подземных водных ресурсов от сезонных гидрологических циклов и геологического строения территории, что требует дальнейшего мониторинга для обеспечения устойчивого и безопасного водоснабжения в условиях климатических изменений и растущего спроса на питьевую воду.

Ключевые слов: *подземные воды, талик, режим, поверхностные воды, химический состав*

Abstract. The groundwater of the Lena River's sub-channel talik is a key source of water supply for Yakutsk and nearby settlements. To study the characteristics of groundwater resource formation in the talik, automatic pressure recording sensors were installed in two wells drilled in the Lena River floodplain near the villages of Kapitonovka and Kangalassy. Measurements were taken in 2023–2025 at intervals of 3 and 12 hours. The results of the observations showed that the rise in water level in the wells lags behind the start of the flood season on the Lena River by 10–13 days. The minimum level of groundwater and surface water is recorded in April, and the maximum level is recorded in the summer months and is caused by snowmelt and rainfall. Seasonal and spatial variability in the chemical composition of water in the Lena River and in the studied aquifers is noted. The data obtained confirm the high dependence of groundwater resources on seasonal hydrological cycles and the geological structure of the territory, which requires further monitoring to ensure sustainable and safe water supply in the context of climate change and growing demand for drinking water.

Keywords: *groundwater, talik, regime, surface water, chemical composition*

Подземные воды подрусловых и пойменных таликов р. Лены – основной источник водоснабжения г. Якутска и близрасположенных населенных пунктов. Несмотря на длительный период эксплуатации таликовых вод, их режиму уделяется весьма мало внимания.

Для выявления особенностей строения пойменных таликов в северной части долины Туймаада были обобщены результаты поисково-оценочных работ АО «Якутскгеология», выполненных в разные годы в районе с. Капитоновка и пос. Кангалассы. Изучение режима подземных вод на этой территории проводилось в процессе выполнения геологоразведочных работ в 2023 г. и сотрудниками ИМЗ СО РАН в период 2024–2025 гг. Для наблюдений за уровнем подземных вод были установлены датчики автоматической регистрации давления в двух скважинах, пробуренных в пойме р. Лены. Одна из них расположена вблизи пос. Кангалассы и каптирует локально-водоносный криогенно-таликовый комплекс четвертичных аллювиальных-нижнемеловых терригенных отложений. Показания уровня воды в скважине записывались каждые 12 часов. Вторая скважина находится в 8 км выше по течению реки около с. Капитоновка. Ею при бурении вскрыт локально-водоносный криогенно-таликовый комплекс четвертичных аллювиальных – верхнеюрских терригенных отложений. Периодичность замеров уровня воды в скважине – каждые три часа. Полученные данные по скважинам усреднялись до среднесуточных значений. Сведения об уровне воды в р. Лене взяты по гидропосту Якутск, расположенному в 22 км выше с. Капитоновка [2].

Река Лена относится к восточносибирскому типу. Она берет свое начало на северо-западном склоне Байкальского хребта и, принимая множество притоков, несет свои воды к морю Лаптевых. Ее длина от истока до г. Якутска составляет 2800 км. Ширина русла изменяется от 5–7 км в южной части изучаемой территории до 2 км в северной части в районе Кангаласского мыса. Для поймы характерно множество мелких проток, обилие старичных

озер, островов и кос. В весеннее половодье значительная часть поймы затопляется, при этом образуется водная поверхность шириной около 10 км. В летние и осенние месяцы наблюдаются несколько паводков, связанных с поступлением надмерзлотных вод из слоя сезонного протаивания и дождевых осадков. Ледообразование на р. Лене происходит в октябре. В зимнюю межень (март – апрель) уровень речных вод находится на отметках 81.7–83.5 м. Его подъем во время весеннего паводка достигает 7–11 м, средняя глубина 3.0 м. Средний годовой сток р. Лены у г. Якутска 7070 м³/с, максимальный 36200 м³/с [3].

Под р. Леней и ее протоками развиты водоносные талики. На изучаемой площади в пойме реки поисковыми скважинами глубиной 70–80 м водоносные породы вскрыты под многолетнемерзлыми четвертичными отложениями мощностью 6.5–30.0 м. Подошва таликов скважинами не вскрыта. Водоносные комплексы состоят из двух горизонтов. Первый от поверхности горизонт сложен четвертичными аллювиальными образованиями (песками, супесями, в нижней части – с прослоями суглинков и включениями гальки). Его мощность изменяется от 10 до 20 м. Вблизи с. Капитоновка второй водоносный представлен верхнеюрскими песчаниками с включениями углей, его мощность его превышает 62 м. Севернее нижнемеловые верхнеюрские породы погружаются и в районе с. Кангалассы под четвертичным водоносным горизонтом залегает нижнемеловой, сложенный песчаниками, алевролитами с прослоями глин. Его вскрытая мощность 43–55 м.

По данным режимных наблюдений в 2024–2025 гг. самый низкий уровень воды в р. Лене и талике под ней отмечался в апреле. В это время абсолютные отметки уровня подземных вод у четвертичного – верхнеюрского водоносного комплекса составили 80.2 м, а аллювиального – нижнемелового комплекса – 66.3 м, что на 5.3 м и 16.2 м ниже р. Лены (рисунок).

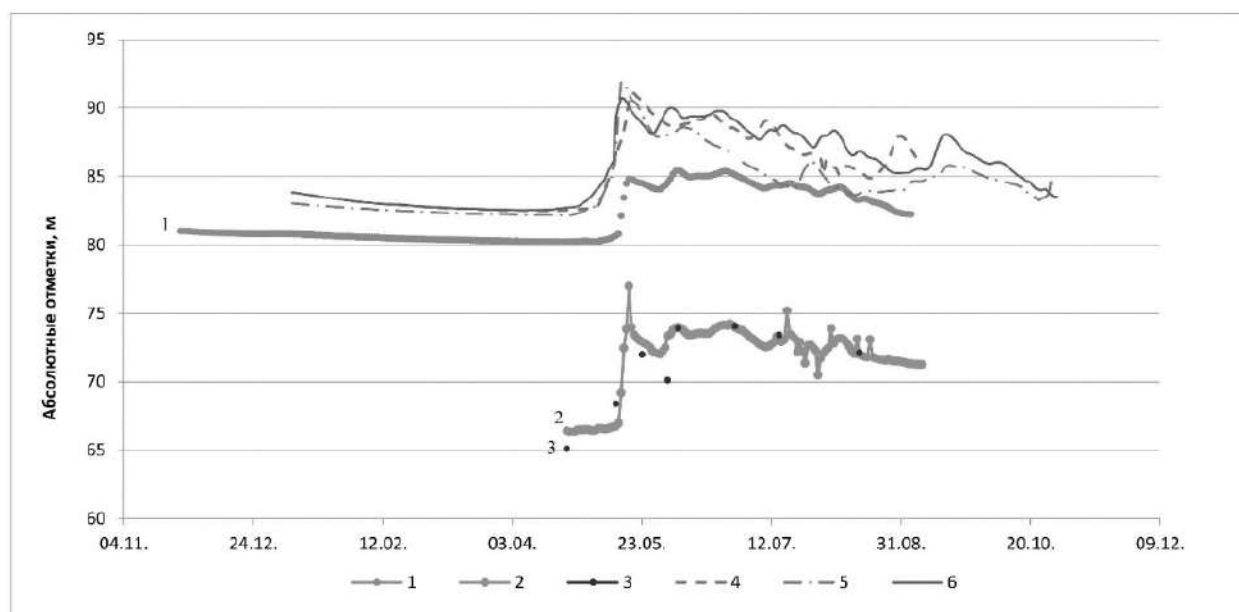


График изменения уровня подземных и поверхностных вод.

1–3 – уровень подземных вод: 1 – четвертичного аллювиального – верхнеюрского терригенного комплекса в 2024–2025 гг., 2 – четвертичного аллювиального – нижнемелового терригенного комплекса в 2025 г., 3 – то же в 2023 г., 4–6 уровень воды р. Лены: 4 – 2023 г., 5 – в 2024 г., 6 – в 2025 г.

Резкий подъем уровня воды в реке произошел в первых числах мая и наблюдался до 17–21 мая. В скважинах уровень подземных вод начал подниматься с запозданием на 10–13 дней. С учетом того, что в это время инфильтрация речных вод в водоносный горизонт исключается из-за наличия перекрывающих мерзлых пород мощностью до 15 м, повышение уровня воды в скважинах происходит за счет передачи давления от реки по талику.

К середине – концу июня после протаивания мерзлого экрана происходит изменение механизма взаимодействия реки и водоносных горизонтов. Вместо упругой передачи давления через воду в талике (который был в мае) начался процесс прямого проникновения речных вод в водоносные пласты. Скорость и объемы взаимодействия реки и подземных вод возросли.

При одинаковом расположении скважин от русла р. Лены разная по времени задержка реакции водоносных горизонтов на изменение уровня в реке обусловлена фильтрационными свойствами пород. Скорость распространения гидравлического напора в четвертичном – верхнеюрском водоносном комплексе оказалась выше, чем в четвертичном – нижнемеловом. Вероятно, это связано с большей мощностью аллювия в южной части рассматриваемой территории. У четвертичных аллювиальных отложений, состоящих преимущественно из песков, супесей и гравия, коэффициент фильтрации составляет 1–10 м/сут, а открытая пористость достигает 25–35 %. В отличие от них, водопропускная способность юрских и меловых пород, представленных песчаниками, алевролитами с прослоями глин и включениями угля, значительно меньше: их коэффициент фильтрации варьируется в пределах 0.01–1.00 м/сут, а открытая пористость – в среднем 10–20 %, что и обуславливает относительно замедленную скорость потока подземных вод по пласту [1].

Химический состав воды в р. Лене определяется условиями ее питания. В конце зимы минерализация речной воды составляет 0.2–0.4 г/дм³. В период половодья, когда основной вклад в сток вносит таяние снежного покрова и жидкие атмосферные осадки, минерализация поверхностных вод уменьшается до 0.1–0.2 г/дм³, а к концу лета она увеличивается до 0.3 г/дм³. Несмотря на колебания величины минерализации, химический тип воды в течение года не меняется: вода р. Лены хлоридно-гидрокарбонатная смешанная по катионам.

Подземные воды подруслового талика в четвертичном аллювиальном – верхнеюрском комплексе имеют аналогичный состав при минерализации 0.4 г/дм³. В четвертичном аллювиальном – нижнемеловом комплексе содержатся гидрокарбонатные кальциево-натриевые воды с минерализацией от 0.3 до 0.9 г/дм³.

Таким образом, выполненные исследования подтверждают тесную гидравлическую связь подземных вод пойменного талика с р. Ленной. Режим подземных вод контролируется гидрологическим режимом поверхностного водотока. Установлена продолжительность временной сдвигки в наступлении максимальных уровней воды в реке и скважинах в период половодья. Она составляет 10–13 сут и зависит от мощности хорошо фильтрующих аллювиальных отложений.

Минерализация подземных вод изменяется по сезонам года, как и в р. Лене. Увеличение ее величины с глубиной связано с ухудшением условий водообмена. По химическому составу подземные воды преимущественно хлоридно-гидрокарбонатные смешанные по катионам.

Данные режимных наблюдений в дальнейшем планируется использовать при моделировании гидрогеологических условий долины р. Лены для эффективного и безопасного использования водных ресурсов, а также для оценки возможности подтопления подземными водами прибрежных территорий за счет увеличения уровня воды в реке.

Список литературы

1. Максимов В.М., Бабушкин В.Д., Веригин Н.Н. и др. Справочное руководство гидрогеолога. 3-е изд., перераб. и доп. Т. 1. Л.: Изд-во недр, 1979. 512 с.
2. Уровень воды онлайн Allrivers [Электронный ресурс]. URL: <https://allrivers.info/gauge/lena-yakutsk/waterlevel/> (дата обращения 14.11.2025).
3. Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулева С.Н., Кирик О.М., Прокопьев В.П., Андросов И.М., Сахаров А.И. Морфология, деформации, временные изменения русла р. Лены и их влияние на хозяйственную инфраструктуру в районе г. Якутска // Геоморфология. 2016. № 3. С. 22–35.

НАДМЕРЗЛОТНЫЕ ВОДЫ СЕЗОННОТАЛОГО СЛОЯ И ТАЛИКОВЫЕ ВОДЫ СМЕШАННОГО ПИТАНИЯ ВОСТОЧНОЙ ЯКУТИИ

Иванова Л.Д.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, ldivanova@mpi.ysn.ru,

Аннотация. В связи с активным освоением территории Восточной Якутии и разрозненными сведениями о надмерзлотных водах возникла необходимость обобщения накопленных данных. В докладе приведена характеристика надмерзлотных вод сезонноталого слоя, рассмотрены особенности распространения и режима подземных вод таликов, в питании которых участвуют над-, меж- и подмерзлотные воды. Обращено внимание на негативное влияние горнопроходческих работ на ландшафтные и гидрогеологические условия изучаемой территории.

Ключевые слова: *источники подземных вод, подрусловые и подозерные талики, дебит, химический состав*

Abstract. Due to the active development of Eastern Yakutia and the lack of organized data on supra-permafrost waters, it has become necessary to summarize the accumulated data. This article describes the characteristics of suprapermfrost waters of the active layer, and overviews the spread and regime of talik groundwater, which is recharged by supra-, inter- and subpermafrost waters. We highlight to the negative impact of mining operations on the landscape and hydrogeological conditions of the studied area.

Keywords: *groundwater springs, river and lake taliks, groundwater discharge, chemical composition*

Надмерзлотные воды территории Восточной Якутии, входящей в Верхояно-Чукотскую гидрогеологическую складчатую область [2], формируют первый гидрогеологический этаж [8] и имеют спорадическое распространение. Они представлены водоносными горизонтами преимущественно поровых локально-водоносных криогенно-таликовых голоценовых отложений и локально трещинных вод верхней части коренных пород зоны свободного водообмена, включающих надмерзлотную верховодку, воды сезонноталого слоя (СТС) и надмерзлотные воды смешанного питания подрусловых и подозерных таликов. Общие закономерности формирования и распространения надмерзлотных вод рассмотрены в XX томе «Гидрогеологии СССР» [1] и отражены на карте надмерзлотных вод Республики Саха (Якутия) масштаба 1:2 500 000 и пояснительной записке к ней [3, 5]. В настоящей работе представлено обобщение ранее опубликованных данных и новых материалов, полученных преимущественно при проведении поисковых геологоразведочных работ в целях водоснабжения и попутно при геологических, инженерных изысканиях и составлении геологических карт масштаба 1:200 000. Всего проанализировано 205 точек наблюдений (источники, скважины, шурфы, данные геофизики).

По материалам исследований воды СТС и надмерзлотная верховодка в коллювиальных, коллювиально-делювиальных и элювиально-делювиальных отложениях с грубым механическим составом и коэффициентом фильтрации от 20 – 40 до 500 м/сут формируются на глубине от 0.2 до 3.0 м, редко до 3.5 м. Накопления этих вод на крутых склонах не происходит, они транзитом разгружаются в местные базисы эрозии, образуя временные источники [5]. Питание осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, таяния ледников и снежников, оттайки сильнольдистых грунтов и конденсационных вод, образуемых в крупнообломочных породах [6]. Водоупором для надмерзлотной верховодки служит сезонный криогенный водоупор, образующийся зимой над таликами, для вод сезонноталого слоя – многолетнемерзлые породы. Продолжительность существования вод СТС июнь – август в зависимости от географической широты местности, высотного расположения и экспозиции склонов. Максимальное оттаивание пород в июле – августе вызывает обильный приток воды в горные выработки, осложняя их проходку. Водоприток в шурфы в летне-осенний период достигают 0.02-0.50 л/с. Затем начинается их спад и мощность водонасыщенного слоя снижается до нуля. При наступлении отрицательных температур воздуха в местах выходов подземных вод образуются небольшие наледи, рост которых прекращается в первой половине зимы в результате полного промерзания водоносного горизонта. На высокогорных участках в формировании водоносного горизонта летом

участвуют талые воды ледников и гольцовых льдов, образуя наиболее постоянные источники, а затем и крупные наледы [4].

По химическому составу надмерзлотные воды четвертичных рыхлых отложений гидрокарбонатные кальциевые или натриевые с минерализацией от 0.012 до 0.240 г/дм³. На участках пиритизации и сульфидного оруднения воды сульфатно-гидрокарбонатные или гидрокарбонатно-сульфатные кальциевые солоноватые с минерализацией от 1.5 до 4.0 г/дм³.

В верхней зоне трещиноватости и выветривания коренных пород разного возраста надмерзлотные воды гидрокарбонатные натриево-кальциевые с минерализацией 0.1–0.3 г/дм³. Источники с подобным составом были обследованы в 2016 г. сотрудниками лаборатории подземных вод во время проведения рекогносцировочных работ на месторождении «Вертикальное», расположенном в пределах Яно-Колымского криогенного бассейна напорных трещинных вод [2]. Вода здесь выходит полосой мелких нисходящих источников протяженностью около 150 м на высоте около 1.5 м от уреза р. Сиреленде из-под выдержанного по мощности (0.19 м) горизонта светло-серых песчаников. Суммарный дебит разгрузки около 25–30 л/с. Температура изливающихся вод составляет 5.3 °С, а минерализация 0.3 г/дм³.

На этой же площади были выявлены участки разгрузки вод СТС, подверженные техногенному воздействию на водоразделе. Результаты обследования показали, что в старых геологоразведочных канавах формируются искусственные озера (рисунок).



Техногенное озеро глубиной более 3 м, шириной более 20 м и длиной около 50 м.

Воды озера слабощелочные солоноватые с минерализацией 2.07 г/дм³. Повышенная минерализация, вероятнее всего, обусловлена процессами растворения и выщелачивания горных пород в условиях застойного водообмена. С учетом глубины озера и величины минерализации воды можно предположить, что в зимний период оно не промерзает до дна и под ним начинает формироваться таликовая чаша. При промерзании подобных водоемов в процессе криогенного концентрирования солей можно прогнозировать формирование талика с солоноватыми водами.

Таликовые воды смешанного питания (над-, меж- и подмерзлотное) распространены по всей территории Арктики и Субарктики Восточной Якутии и исследованы в целях водоснабжения населенных пунктов и при геологоразведочных работах различной

направленности. В основном эти воды приурочены к долинам рек и крупным озерным котловинам.

Подрусловые и пойменные талики распространены в аллювиальных и ледниковых отложениях долин рек и их притоках. Размеры и их водоносность зависят от ширины и морфологии долины реки, мощности аллювия, размера водосборной площади. Фильтрационные свойства пород в подрусловых таликах ухудшаются вниз по разрезу. Если в хорошо промытых грубообломочных отложениях в верхней части разреза коэффициент фильтрации достигает 400–600 м/сут, то в нижней, содержащей более мелкую фракцию, вплоть до пылеватой, снижается от 6.0 до 0.1 м/сут. Основное питание талики получают за счет атмосферных осадков и поверхностных водотоков. В холодный период года при промерзании талики нередко разобщаются мерзлотными перемычками на отдельные бассейны. Следствием этого являются субаквальные источники, функционирующие в зимний период и образующие наледи. Их дебит снижается к концу зимы, при полном промерзании или осушении верхней части талика источники также полностью прекращают свое существование. В бассейне р. Индигирка В.Ф. Шишкиной отмечено около 50 таликов в долинах рек Тихон-Юрягэ, Еченка, Хатыннах, Куобах-Бага и др. общей суммарной протяженностью около 200 км. Температура воды в надмерзлотных таликах изменяется в течение года от 3–4 до 0.2 °С [1]. Воды подрусловых и пойменных надмерзлотных таликов по химическому составу гидрокарбонатные или сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые с минерализацией 0.1–0.2 г/дм³. Под мелкими водотоками по данным геологоразведки водоносный горизонт имеет небольшую мощность – 1–10 м, а под руслами крупных рек – до 30 – 60 м. В крупных межгорных впадинах, таких как Момо-Селенняхская, Куйдусунская, Эльгенская, Оймяконская и др., мощность отложений составляет десятки, а иногда и более метров. С этими отложениями связаны надмерзлотные талики речных долин и отложений морен значительной мощности, образующие гигантские наледи. Такие талики исследованы в поймах рек Туора-Юрях, Буор-Юрях, Тарын-Юрях и др. [7]. Коэффициент фильтрации в галечниковых грунтах талика р. Адычи, выявленный при строительстве Адычанской ГЭС, по данным В.А. Базылева и Ю.А. Мурзина и др. в 1987 г. составлял 1–26 м/сут при удельном дебите скважин 0.5–2.4 л/с.

Наиболее устойчивы подрусловые талики смешанного питания (над- меж- и подмерзлотные воды), распространенные на площадях с тектонической активностью территории. К ним относятся неотектонические и обновленные древние разломы горной системы хребтов Черского, Верхоянского и др. Сейсмическая активность в этих районах по сообщению директора Якутского филиала Геофизической службы РАН С. Шибаева достигает 4–7 баллов на глубинах 8–10 км с афтершоками близко к поверхности земли на глубине 10–30 м (в среднем течении р. Селеннях). В зимний период запасы таликовых вод снижаются за счет сокращения размеров талика при промерзании. Такого типа талики вскрыты скважинами в поймах рек Яна, Омолой, Индигирка и в их крупных притоках. В специфических мерзлотно-гидрогеологических и геоморфологических условиях талики формируют крупнодебитные источники, образующие гигантские наледи, некоторые из которых перелетывают. По химическому составу воды таликов смешанного питания гидрокарбонатные, реже сульфатные кальциевые, слабоминерализованные, с хорошими бактериологическими показателями. Однако был известен случай загрязнения подруслового талика р. Яны в районе г. Верхоянска. По материалам В.Г. Игнатьева за 1990 г. бактериологический анализ вод подруслового талика показал значительное отклонение по коли-индексу –230, коли-титру – 4 и число колоний в 1 см³ – 120, что не соответствует нормам питьевых вод.

Воды несквозных подозерных таликов локально исследованы в пределах Яно-Индигирской и Колымской низменностей при поисково-разведочных работах в целях водоснабжения населенных пунктов. Некоторые из них используются для водоснабжения (оз. Абый, Титтях и др.). Мощность таликов колеблется от 3 до 90 м, химический состав и фильтрационные свойства зависят от литологического состава вмещающих пород (пески, гравийно-галечниковые отложения, остатки растительности, лигниты, ил).

Ледниковые и водно-ледниковые отложения хребта Сунтар-Хаята формируют надмерзлотные воды таликов, которые образуют высокодебитные (до 1400 л/с) ультрапресные гидрокарбонатные источники с минерализацией около 0.04 г/дм³, образующие наледи.

Таким образом, на рассматриваемой территории надмерзлотные воды СТС, хотя и имеют повсеместное распространение, но ограничены во времени существования и обладают небольшими запасами. Подрусловые, пойменные и подозерные талики смешанного питания обладают стабильной водоносностью, вода в них обладает преимущественно хорошим химическим и бактериологическим составом и используется для водоснабжения.

В условиях современного техногенеза пренебрежение рекультивацией нарушенного природного ландшафта в северных условиях может привести к негативным последствиям. К ним относятся процессы растворения и выщелачивания пород в условиях застойного водообмена, что приводит к повышению минерализации надмерзлотных вод и их агрессивности к строительным материалам и конструкциям. Вымывание вредных микроэлементов из шламовых отходов хвостохранилищ может привести к ухудшению качества воды в таликовых горизонтах. Одним из неблагоприятных последствий является также загрязнение надмерзлотных вод при проведении геологоразведочных, горных, лесоперерабатывающих работ, эксплуатации теплоэнергетических объектов, попадание хозяйственно-бытовых стоков в водоносный горизонт.

В связи с активным освоением рассматриваемой территории и возведением инженерных сооружений возможна активизация наледных процессов. Причин может быть много, основные из них – изменение водно-теплового режима пород и условий поверхностного и подземного стока, поэтому при возведении линейных и других инженерных сооружений, горных выработок, карьеров, отвалов, разработке месторождений полезных ископаемых необходимо предусматривать мерзлотно-гидрогеологические изыскания и проектировать противоналедные мероприятия.

Список литературы

1. Гидрогеология СССР. Том XX. Якутская АССР. М.: Недра, 1970. 383 с.
2. Карта мерзлотно-гидрогеологического районирования Восточной Сибири масштаба 1:2 500 000 // Гл. ред. Мельников П.И., М.: ГУГК, 1983. 4.0 п. л.
3. Карта надмерзлотных вод Республики Саха (Якутия). М-б 1:2 500 000 // Составители Л.Д. Иванова, Т.Н. Лебедева, Н.С. Ломовцева, Н.М. Никитина, В.М. Пигузова. Якутск: Якутское аэрогеодезическое предприятие Федеральной службы геодезии и картографии России №14, 1993. 4.0 п.л.
4. Корейша М.М. Тарыны (наледи) Сунтар-Хаята // Материалы гляциологических исследований. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 27–33.
5. Пояснительная записка к Карте надмерзлотных вод Якутской-Саха ССР масштаба 1:2 500 000 // Л.Д. Иванова, Т.Н. Лебедева, Н.С. Ломовцева, Н.М. Никитина, В.М. Пигузова, О.Н. Толстихин. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1991. 40 с.
6. Рейнюк И.Т. Конденсация в деятельном слое вечной мерзлоты // Тр. ВНИИ-1. Магадан, 1959. Вып. 13. С. 1–24.
7. Толстихин О.Н. Наледи и подземные воды северо-востока СССР. Новосибирск, Наука, 1974. 164 с.
8. Шепелёв В. В. Надмерзлотные воды криолитозоны // Отв. ред. Р.В. Чжан. Новосибирск: Гео, 2011. 167 с.

ФОРМИРОВАНИЕ ХОЛОДНЫХ ЩЕЛОЧНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОЙ СЕРПЕНТИНИЗАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ СОЛДАТСКИХ ИСТОЧНИКОВ, КАМЧАТКА)

Калачева Е.Г., Волошина Е.В., Топчиева О.М.

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,
keg@kscnet.ru*

Аннотация. На северо-востоке п-ова Камчатка, в долине р. Белой, разгружается уникальный для Камчатки тип холодных щелочных вод, формирующихся в результате современного процесса серпентинизации гипербазитов (Солдатские источники). Источники с наиболее высокой минерализацией (до 800 мг/дм³) и значениями pH свыше 11.5 характеризуются хлоридным натриевым составом, при выходе вод на поверхность формируются протяженные травертиновые плащи.

Ключевые слова: ультращелочные воды, серпентинизация, Солдатские источники, Камчатка

Abstract. In the northeastern part of the Kamchatka Peninsula, in the valley of the Belaia River, a unique type of cold alkaline waters for Kamchatka is discharged. These waters are formed as a result of the ongoing process of serpentinization of ultrabasic rocks (Soldatskie Springs). The springs with the highest mineralization (up to 800 mg/L) and pH values above 11.5 are characterized by a sodium chloride composition. As the waters discharge to the surface, they form extensive travertine mantles.

Keywords: ultra-alkaline waters, serpentinization, Soldatskie Springs, Kamchatka

Щелочные воды с pH >10 формируются преимущественно в массивах ультраосновных пород в результате серпентинизации [4]. Серпентинизация ультраосновных пород протекает в различных геологических обстановках как на дне океанов, так и на континентах. На суше разгрузка подземных щелочных вод (pH>10), как правило, представлена холодными источниками с небольшим дебитом. Ареал их распространения достаточно широк. Одним из районов развития таких вод является долина р. Белой (п-ов Камчатка), которая прорезает офиолитовый комплекс массива горы Солдатской на п-ове Камчатский Мыс. Несмотря на малый дебит, источники хорошо заметны издали благодаря формирующимся у выходов травертиновым плащам, сложенным кальцитом, арагонитом или их смесью [2, 6].

Первые данные о химическом составе одного из наиболее минерализованных источников этого района были опубликованы в 2014 г. [1]. Целенаправленное опробование отдельных выходов было выполнено в 2022 г., после чего источникам было присвоено название «Солдатские» [2]. Детальная гидрохимическая съемка была проведена авторами в 2023 и 2025 гг. Частичные результаты исследования 2023 г. легли в основу работы [6], где помимо гидрогеохимии представлены данные по минералогии и изотопному составу ($\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$, стронций) формирующихся травертинов.

В настоящей публикации приводится общее описание и геохимическая характеристика Солдатских источников, включая макро- и микроэлементный состав.

Полуостров Камчатский Мыс расположен на северо-восточном побережье п-ова Камчатка. С востока и юга он омывается водами Тихого океана, а с запада — озером Нерпичье. Единственная транспортная связь с Большой землей и пос. Усть-Камчатск осуществляется посредством паромной переправы через протоку, соединяющую оз. Нерпичье с Камчатским заливом.

С геологической точки зрения северная часть полуострова сложена преимущественно меловыми вулканогенно-осадочными породами, в то время как южная часть представлена интенсивно дислоцированными вулканогенно-осадочными породами и породами офиолитового комплекса, также имеющими меловой возраст [3]. Основу офиолитовой формации составляют гипербазиты, серпентинизированные в разной степени. Наиболее крупное тело — массив горы Солдатской площадью около 70 км², центральную часть которого прорезает долина р. Белой.

В верхнем течении р. Белая зажата в крутых эрозионных врезках глубиной до 800 м и представляет собой бурный поток со скоростью течения около 1.5 м/с. В нижнем течении она

распадается на несколько мигрирующих рукавов и протекает по широкой выположенной долине, сложенной аллювиально-делювиальными отложениями. Разгрузка щелочных вод осуществляется в верховьях данного водотока.

Солдатские источники представлены двумя группами выходов (Щелочная и Орлиная), а также одним изолированным выходом, расположенным в отдалении от основной зоны разгрузки. Посмотреть расположение всех опробованных выходов и краткую физико-химическую информацию можно в геоинформационной системе «Термоминеральные воды Курило-Камчатского региона», созданной в ИВиС ДВО РАН <https://kamkursprings.nextgis.com/resource/28/display?panel=layers>.

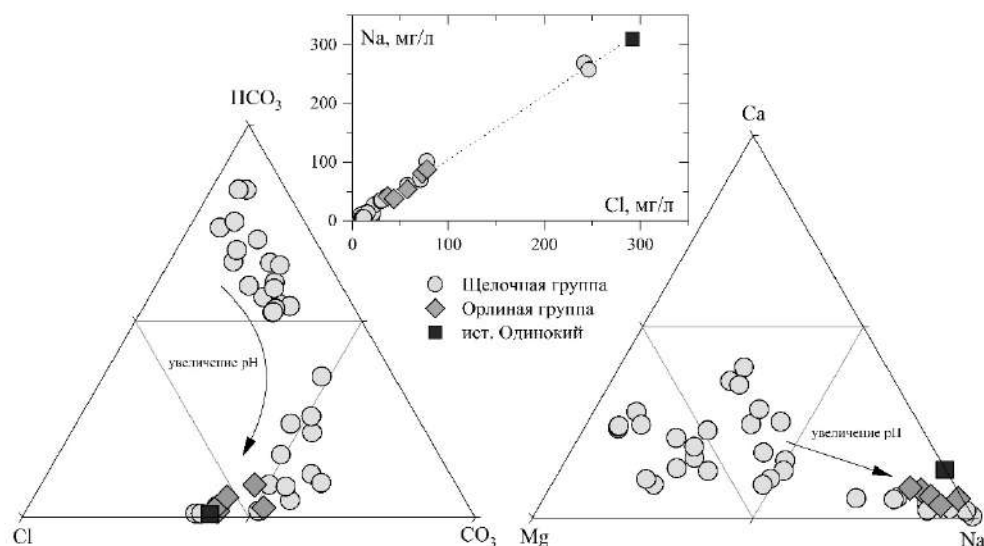
Наиболее крупная группа (Щелочная) насчитывает более 20 выходов и приурочена к верховьям левого притока (руч. Щелочной) р. Белой на абсолютных отметках 500–750 м. Эту группу можно разделить на две подгруппы: Верхнюю и Нижнюю. Источники Верхней подгруппы обладают наибольшими дебитами (1–2 л/с), обусловленными разбавлением грунтовыми водами. Они формируют протяженные ручьи, впадающие в дренирующий водоток. Для этих вод характерна крайне низкая минерализация (45–75 мг/дм³), значения pH от 10 до 11 и температура 2.5–5.0 °С. Поскольку разгрузка в данной части долины происходит в зоне развития современного делювия и активных оползнево-обвальных процессов, формирования сплошных травертиновых плащей не наблюдается. Карбонатные отложения, образующиеся у выходов вод, регулярно сносятся в русло руч. Щелочного вместе с обломочным материалом.

Нижняя подгруппа включает несколько источников с температурой 5–6 °С, формирующих веерообразные многослойные травертиновые плащи, которые спускаются к водотоку. На правом борту ручья в небольшом гроте расположено микроозеро (ист. Гротовый), отличающееся наиболее высокими в данной группе минерализацией (640 мг/дм³) и значением pH (12.3). Со свода грота происходит просачивание минерализованной воды, которая аккумулируется в его пониженной части. Поверхность грота сложена травертином, инкрустированным многочисленными короткими (3–7 см) сталактитами.

Вторая группа (Орлиная) расположена на высоком правом борту долины р. Белой на абсолютной отметке ~540 м. Она состоит из двух линейных зон разгрузки, разделенных выступом коренных пород. Вода вытекает из многочисленных трещин в частично выветрелых гипербазитах и стекает по крутому склону в правый приток основного водотока. Эта группа является наиболее труднодоступной; ее опробование удалось провести только в 2025 г. В местах выхода вод и по руслам формирующихся ручейков происходит осаждение карбонатов (арагонит), однако, как и в случае с Верхней подгруппой Щелочной группы, плотных многослойных плащей здесь не образуется. Температура воды составляет 4–5 °С, pH 10.8–11.2, минерализация — 130–250 мг/дм³.

В 4 км выше по долине р. Белой от этой группы находится изолированная точка разгрузки (ист. Одинокый). Для источника характерны самые высокие значения pH (12.6) и минерализации (840 мг/дм³), а также наиболее протяженный травертиновый плащ.

Определение макрокомпонентов в водных пробах и изучение минерального состава осадков выполнялись в ЦКП «Камчатский центр элементного, минерального, изотопного анализа» ИВиС ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский). Проведенные аналитические исследования показали, что по химическому составу воды Солдатских источников относятся к гидрокарбонатным магниевым и хлоридным (хлоридно-гидрокарбонатным) натриевым типам в зависимости от величины pH (рисунок). Для всех групп источников установлена линейная зависимость между содержанием хлорид-ионов (Cl⁻) и натрия (Na⁺), отражающая общую тенденцию к разбавлению грунтовыми водами.



Химический состав Солдатских источников.

Источники с максимальными значениями pH характеризуются также наиболее высокими и близкими по величине концентрациями Cl^- и Na^+ ($\sim 300 \text{ мг/дм}^3$) (таблица). Концентрация магния (Mg^{2+}) в воде резко снижается при $\text{pH} > 11$ (рисунок), что типично для вод данного класса. Как показано в ряде исследований, это связано с осаждением брусита ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), которое начинается при значениях $\text{pH} > 11$. По результатам рентгенофазового анализа в травертинах Солдатских источников, сложенных преимущественно кальцитом и аргонитом, был обнаружен брусит $\text{Mg}(\text{OH})_2$, гидроталькит $\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16} \cdot \text{H}_2\text{O}$, а также нортупит $\text{Na}_3\text{Mg}(\text{CO}_3)_2\text{Cl}$ и квинтинит $\text{Mg}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{12}\text{CO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

Макрокомпонентный и микроэлементный состав ист. Одинокий

Макрокомпоненты, мг/дм ³									
pH	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Минерализация	
12.6	4	206	292	297	13.5	29.7	<0.1	840	
Микроэлементы, мкг/дм ³									
Al	Fe	Sr	B	Pb	Zn	As	P	Li	Ti
261	258	29.4	20.88	19.60	12.33	11.77	9.41	8.31	4.80
Cu	Ba	Mn	Cr	Ni	Rb	Sb	V	Zr	Sn
4.087	3.97	2.96	1.99	1.56	0.69	0.39	0.36	0.33	0.29
Mo	Co	Cs	Sc	Tl	Ga	Ge	Cd	Y	Ag
0.2	0.15	0.12	0.064	0.06	0.048	0.042	0.036	0.031	0.008
Hf	Bi	Nb	W	Th	Te	Be	U	Ta	ΣРЗЭ
0.008	0.006	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.0003	0.124

Содержание кальция в воде также не очень велико, за исключением источника Одинокий, в котором отмечен самый высокий pH (12.59) и концентрация Ca (30 мг/дм^3) (таблица), что значительно превышает средние значения по группам ($4\text{--}7 \text{ мг/дм}^3$). Низкие содержания кальция в воде также, скорее всего, связаны с образованием карбонатных минералов, в первую очередь CaCO_3 , при разгрузке на поверхности.

Микроэлементный анализ водных проб выполнялся в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток). С учетом общей низкой минерализации вод Солдатских источников суммарное содержание микроэлементов в них также крайне невелико и варьируется от 0.1 до 0.7 мг/дм^3 . Закономерно то, что максимальные концентрации отмечены в источниках с наибольшей минерализацией. По уровню содержания в пробах воды ист. Одинокий (таблица) можно выделить несколько групп элементов: 1)

концентрации более 0.1 мг/дм³ характерны для алюминия и железа; 2) содержание от 1 до 30 мкг/дм³ установлено для следующих элементов (в порядке убывания концентрации): Sr, B, Pb, Zn, As, P, Li, Ti, Cu, Ba, Mn, Cr, Ni; 3) к группе элементов с концентрациями от 0.1 до 1 мкг/дм³ относятся Rb, Sb, V, Zr, Sn, Mo, Co, Cs; 4) наименьшие концентрации в интервале 0.0001–0.1 мкг/дм³ выявлены для Sc, Tl, Ga, Ge, Cd, Y, Ag, Hf, Bi, Nb, W, Th, Te, Be, U, Ta. Суммарное содержание редкоземельных элементов 0.124 мкг/дм³.

Солдатские источники представляют собой уникальный для Камчатки тип холодных щелочных вод, формирующихся в результате современного процесса серпентинизации гипербазитов массива горы Солдатской. Если в мировой литературе ультращелочным водам посвящено значительное число работ, то для территории России данное проявление является пока единственным известным.

По основным параметрам (низкая минерализация, pH в диапазоне 10.0–12.5, низкие температуры) Солдатские источники схожи с другими источниками, разгружающимися в пределах ультраосновных массивов. Однако их ключевой особенностью является принадлежность к иному гидрохимическому типу с преобладанием ионов натрия над кальцием в катионном составе. Более подробно особенности этих вод рассмотрены в работе [6].

Как было показано ранее, формирование вод подобного типа происходит в пределах древних вулканических массивов выше регионального уровня грунтовых вод, вблизи поверхности, без длительного контакта с вмещающими породами [5]. Область питания расположена гипсометрически выше области разгрузки. Именно в такой проточной системе с коротким временем водообмена, при соотношении вода/порода значительно меньше единицы, возможно формирование ультращелочных вод.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВиС ДВО РАН по теме “Мониторинг влияния вулканической и гидротермальной активности на химический состав рек Камчатки” (FWME-2024-0014), выполняемой по Межведомственной программе комплексных научных исследований Камчатского полуострова и сопредельных акваторий в 2024–2026 гг.

Список литературы

1. Новаков Р.М., Савельев Д.П., Белова Т.П., Паламарь С.В. Травертины Камчатского Мыса // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский, 2014. С. 98–104.
2. Таран Ю.А., Савельев Д.П., Пальянова Г.А., Покровский Б.Г. Щелочные воды ультраосновного массива г. Солдатской (Камчатка): химический и изотопный состав, минералогия и ¹⁴C-возраст травертинов // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 510, № 1. С. 30–37.
3. Хотин М.Ю., Шапиро М.Н. Офиолиты Камчатского Мыса (Восточная Камчатка): строение, состав, геодинамические условия формирования // Геотектоника. 2006. № 4. С. 61–89.
4. Leong J.A.M., Shock E.L. Thermodynamic constraints on the geochemistry of low-temperature continental serpentinization-generated fluids // American Journal of Science. 2020. Vol. 320, № 3. P. 185–235.
5. Taran Y.A., Kalacheva E.G. Ultra-acidic and hyper-alkaline waters of the Kuril-Kamchatka region. Formation and related issues // Proceedings of the 3rd IAGC International Conference Water Rock Interaction-18 & Applied Isotope Geochemistry-15. P. 639–642.
6. Taran, Y., Kalacheva, E., Savelyev, D., et al. Hyperalkaline waters and travertines of the ophiolite complex of Mt. Soldatskaya, Kamchatsky Mys Peninsula, Kamchatka, Russia // Geochemical Journal. 2024. Vol. 58, 127–137.

РОЛЬ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ПИТАНИИ НАДМЕРЗЛОТНЫХ ВОД

Макаров В.Н., Павлова Н.А., Маркова С.А.

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск,
stellapotapova93@mail.ru*

Аннотация. Рассматриваются результаты геохимического мониторинга снежного покрова и надмерзлотных вод на геокриологическом стационаре «Туймаада». Изучены температурные характеристики и химический состав снежного покрова и подстилающих почв. Проведена оценка изменения концентрации ионов в снежном покрове и надмерзлотных водах в период 2009–2017 гг. Установлена зависимость минерализации надмерзлотных вод сезонноталого слоя от минерализации и количества снега предыдущего года.

Ключевые слова: *снежный покров, почвы, надмерзлотные воды, химический состав*

Abstract. The results of geochemical monitoring of snow cover and suprapерmafrost water at the Tuymaada geocryological station are discussed. The temperature characteristics and chemical composition of the snow cover and underlying soils are studied. Changes in ion concentrations in the snow cover and suprapерmafrost waters from 2009 to 2017 are assessed. The dependence of the mineralization of suprapерmafrost waters in the seasonally thawed layer on the mineralization and amount of snow from the previous year is established.

Keywords: *snow cover, soils, suprapерmafrost waters, chemical composition*

Изучению химического состава снежного покрова природных и техногенных ландшафтов Якутии посвящен ряд исследований, выполняемых Институтом мерзлотоведения СО РАН с середины XX в. по настоящее время. Целью работы является оценка и анализ результатов геохимического мониторинга снежного покрова (СП) и роли снега в питании надмерзлотных вод (НМВ) в природных условиях Центральной Якутии. Оценка роли СП в формировании надмерзлотных вод изучалась авторами на комплексном геокриологическом стационаре ИМЗ СО РАН «Туймаада» (КГСТ) с 2009 по 2017 г.

Стационар КГСТ расположен в Центральной Якутии, в пригородной юго-западной части г. Якутска, на II надпойменной террасе р. Лены, представляющей собой почти горизонтальную поверхность с альтитудой около 110 м.

Геологический разрез сложен (сверху вниз): почвенно-растительным горизонтом до 0.2–0.3 м; супесью – до 0.6–0.8 м; песком с прослоями супеси – 1.6–1.8 м; далее до 20 м – песком мелко- и среднезернистым. Мощность сезонноталого слоя на возвышенном участке 2 м, на склоне грунты протаивают до глубины 2.5–3.0 м.

В восточной части стационара произрастает сосново-лиственничный лес. Небольшие участки лесной и кустарниковой растительности присутствуют и в его центральной части.

Климат в районе КГСТ характеризуется резкой континентальностью, продолжительной и малоснежной зимой с низкими температурами воздуха, жарким и коротким летом с большой инсоляцией и малым количеством осадков [3]. Годовое количество осадков в среднем за период с 1961 по 2020 г. варьируется от 140 до 250 мм, коэффициент увлажнения 0.8–1.0. Осадки в зимний период выпадают неравномерно. В период наблюдений их суммарное количество изменялось от 62 до 93 мм. Продолжительность холодного периода (со среднесуточной температурой ниже 0 °С) около 220 дней. Средняя зимняя температура воздуха (октябрь – апрель) составляет –25.9° С [2].

В начальный период зимнего сезона (октябрь – ноябрь) высота снежного покрова увеличивается с постоянной скоростью, т. е. практически линейно во времени. После достижения максимальной за зиму высоты снега (вторая половина марта) происходит резкое ее уменьшение за счет испарения, оседания и начала снеготаяния. Последний этап длится, как правило, три – четыре недели. Разрушение и сход снежного покрова происходят в третьей декаде апреля, иногда в первых числах мая. Максимальная высота снега на КГСТ варьируется в среднем от 30 до 50 см. Плотность снега в середине зимы составляет 150–160 кг/м³, а в конце зимнего сезона – 200–250 кг/м³.

Среднегодовая температура грунтов на глубине 1 и 2 м на стационаре составляет соответственно –2.4 и –2.0 °С. Температура грунтов на поверхности в период наблюдений

переходит через 0 °С 6 мая, но положительные дневные температуры наблюдаются с 25 апреля.

Для изучения объема и химического состава зимних осадков в ходе мониторинга на территории КГСТ была смонтирована установка по сбору осадков. Аппаратура установлена в центре участка, на ровной поверхности, на высоте 1.2 м. В месте установки аппаратуры отсутствуют источники загрязнения атмосферы, ландшафт исключает высокое запыление воздуха. Отбор проб осуществляется один раз в месяц.

На территории КГСТ проводится также мониторинг физических характеристик (температура приземного воздуха и снега на поверхности и на почве, высота, плотность, влагозапас) и химического состава снежного покрова ежегодно в период с октября (ноября) по апрель (май) и почвы. Интервал отбора проб составлял десять дней (в апреле – 3 дня), до полного схода СП в конце апреля, в отдельные годы – до начала мая.

Для изучения мерзлотно-гидрогеологической обстановки и дальнейшего гидрогеологического мониторинга на стационаре «Туймаада» в 2008–2009 гг. были пробурены три скважины. Водоносный слой был вскрыт в марте 2009 г. в мелкозернистых песках в интервале от 2 до 3 м [4]. На территории КГСТ формирование вод СТС происходит в конце апреля – мае, сразу после схода снежного покрова. По мере протаивания грунтов в теплый период уровень надмерзлотных вод СТС понижается при увеличении мощности водоносного слоя. Минерализация и химический состав надмерзлотных вод зависят от особенностей литологического состава и дисперсности пород, солесодержания в почвенном горизонте, количества атмосферных осадков, условий водообмена, глубины залегания подземных вод, режима промерзания пород.

Химический анализ снега и подземных вод выполнялся в лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН. В пробах определялось содержание макрокомпонентов: SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ; микроэлементов – Cs, Li, Sr, Ba, F, P; измерялась величина pH, Eh и электропроводности.

Количество ионов в снежном покрове (Р) рассчитывалось по формуле:

$$P = \frac{100 \cdot C \cdot V}{\pi \cdot r^2}, \text{ мг/м}^2/30 \text{ дней},$$

где C – концентрация в растворе образца, мг/мл; V – исследуемый объем, мл; r – радиус горлышка сосуда с образцом, мм.

Для расчета количества ионов, поступавших при таянии СП в грунты и надмерзлотные воды, использовались данные снегового мониторинга за апрель. Химический состав снеговой воды в этот период оставался преимущественно, гидрокарбонатно-кальциевым с высоким содержанием аммония, ультрапресным с диапазоном изменения минерализации в пределах одного порядка 19–87 мг/дм³, в среднем около 25 мг/дм³.

Солевой состав почвы под снегом на глубине 0.05–0.10 м в этот период магниевый-кальциевый гидрокарбонатный с высоким содержанием нитратов и величиной засоленности 0.034 %.

Характер изменения плотности солевого состава снежного покрова позволяет выделить три фазы процесса вымывания химических компонентов [7].

Первая – до конца марта, когда при таянии общий теряемый объем химических элементов снега составляет около 20 % и наибольший вынос из СП (при $t < 0$ °С) характерен для хорошо растворимых гидрокарбонатов и сульфатов (20–25 %), при соотношении $C > S > \text{Cl} > \text{N}$.

Вторая – с окончания первой фазы и до конца первой декады апреля (также при $t < 0$ °С, связана с интенсивным стоком воды – снижением влагозапаса примерно на 1/3 до 41.4 мм и синхронным понижением плотности солевого состава снежного покрова также на 1/3 до 10.7 г/м². Общий теряемый запас снегом растворимых солей составляет 13 %, при интенсивном вымывании хлоридов и нитратов (30–40 % от их общего количества).

И, наконец, третья фаза – период интенсивного снеготаяния и относительной стабилизации влагозапаса и плотности солевого состава СП (при $t > 0$ °С). Общий теряемый

запас снегом растворимых солей уменьшается до 8 %, при наиболее интенсивном вымывании хлоридов и нитратов (25–30 % от их общего количества). В этот период наблюдается наиболее активное нисходящее перемещение обширного комплекса ионов из подошвенных горизонтов СП в почву: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , NH_4^+ и Sr^{2+} , которое сопровождается возрастанием засоленности почвы.

Промачивание грунта снеговыми водами происходит весьма неравномерно. Впитывание талой воды начинается во второй половине апреля, когда температура пород еще отрицательная, и продолжается до схода снежного покрова (начало мая). При этом влажность песка в верхнем слое повышается более чем в два раза: с 4 % в начале марта до 11 % в конце апреля. В мае отмечается наиболее интенсивное протаивание сезонно-мерзлых грунтов, и в конце месяца мощность талого слоя достигает 0.5 м [5]. Просачивание снеговой воды и таяние мерзлых грунтов приводят к образованию в весенний период большого количества влаги. Это определяет высокую интенсивность испарения, которая в мае оценивается в $2.79 \text{ мм} \cdot \text{сут}^{-1}$, что составляет от 1/3 до 1/2 теплого периода года [6].

Результаты мониторинга химического состава СП и НМВ на территории КГСТ в конце холодного периода (апрель) 2009–2017 гг. приведены в таблице.

Суммарное количество ионов в СП (апрель) и величина минерализации НМВ

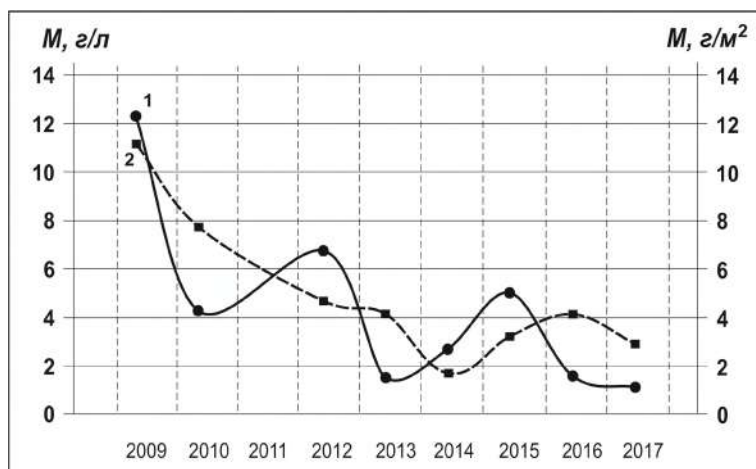
Год,	СП сумма ионов, г/м ²	НМВ, минерализация, г/дм ³
2009	12.32	11.162
2010	4.34	7.691
2012	6.76	4.680
2013	1.55	4.126
2014	2.72	1.705
2015	5.06	3.236
2016	1.62	4.151
2017	1.12	2.908

Температура грунтов на поверхности в апреле изменялась от –6 в начале месяца до +2–3 °С на глубине 0.1 м, переходит через 0 °С 6 мая, но положительные дневные температуры наблюдаются с 25 апреля. В марте и большей части апреля при отрицательной температуре миграция ионов из подошвенной части СП в грунты не может происходить в гравитационных водах и осуществляется по пленочным водам. Объемы растворенных веществ при пленочной миграции, по-видимому, весьма значительны, так как, проникая в последующем до уровня НМВ, влияют на их минерализацию (рисунок).

При анализе соотношения НМВ и СП на рисунке надо иметь в виду, что зимой 2011–2012 гг. надмерзлотные воды замерзли и сохранился надмерзлотный слой – криопэг [4], поэтому зависимость изменения минерализации НМВ от объема ионов в СП выражена слабо. Однако с 2012 г. и в последующем анализировались собственно надмерзлотные воды сезонноталого слоя и наблюдается четкий временной сдвиг: минерализация НМВ текущего года зависит от минерализации и количества снега предыдущего года.

Таким образом, установлена зависимость минерализации надмерзлотных вод сезонноталого слоя от солевого состава и количества снега предыдущего года. Поступление минеральных веществ и влаги при таянии снега в грунты и надмерзлотные воды сезонноталого слоя происходит в пленочных водах при отрицательной температуре СП и грунтов, почти до конца апреля. В дальнейшем при постоянно положительной температуре грунтов миграция продолжается в гравитационных водах. Значительное увлажнение почвы в этот период способствует переходу пленочных вод в свободную (гравитационную). Основным источником питания надмерзлотных вод в конце холодного времени являются свободные и пленочные воды.

Рассматриваются результаты геохимического мониторинга снежного покрова и надмерзлотных вод на геокриологическом стационаре «Туймаада». Изучены температурные характеристики и химический состав снежного покрова и подстилающих почв. Проведена оценка изменения концентрации ионов в снежном покрове и надмерзлотных водах в период 2009–2017 гг.



Динамика суммы ионов в СП (г/м²) – 1; минерализации НМВ (г/дм³) – 2.

Установлена зависимость минерализации надмерзлотных вод сезонноталого слоя от солевого состава и количества снега предыдущего года. Поступление минеральных веществ и влаги при таянии снега в грунты и надмерзлотные воды сезонноталого слоя происходит в пленочных водах почти до конца апреля, а в дальнейшем при постоянно положительной температуре грунтов в гравитационных водах. Значительное увлажнение почвы в этот период способствует переходу пленочных вод в свободную (гравитационную). Основным источником питания надмерзлотных вод в конце холодного времени являются свободные и пленочные воды.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований ИМЗ СО РАН №126020516689-6 «Подземные воды криолитозоны, особенности их взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами».

Список литературы

1. Анисимова Н.П. Химический состав инфильтрата атмосферных и конденсационных вод в сезоннопротаивающих песках Центральной Якутии // Взаимосвязь поверхностных и подземных вод мерзлой зоны, Якутск, Кн. изд-во, 1980, С. 82–90.
2. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2021, 156 с.
3. Гаврилова М.К. Климат Центральной Якутии. Изд. 2-е. Якутск: Якут. кн. изд-во, 1973. 120 с.
4. Данзанова М.В. Динамика мерзлотно-гидрогеологических условий на территории стационара «Туймаада» (г. Якутск) // Наука и образование. 2014. № 4. С. 46–50.
5. Жирков А.Ф., Железняк М.Н., Пермяков П.П. Влияние инфильтрации летних жидких атмосферных осадков на термовлажностный режим грунтов // Материалы XI международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения. Магадан: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2017. С. 245–246.
6. Макаров В.Н., Жирков А.Ф., Осипов В.П., Маркова С.А. Количественная оценка испарения и химический состав атмосферных осадков в Центральной Якутии // Криосфера Земли, 2024, Т. XXVIII, № 6, с. 58–66. DOI: 10.15372/KZ20240605.
7. Макаров В.Н., Маркова С.А. Геохимические аспекты весеннего разрушения снежного покрова на Центрально-Якутском комплексном геокриологическом стационаре «Туймаада» // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2018. Т. 26, № 4. С. 64–71. Doi: 10.31242/2618-9712-2018-26-4-64-71.

ГЕЛИОТЕРМАЛЬНЫЕ ОЗЕРА НА УЧАСТКЕ РАЗГРУЗКИ ХОЛОДНЫХ ПОДЗЕМНЫХ РАССОЛОВ В КЕМПЕНДЯЙСКОЙ ВПАДИНЕ

Полубелова А.В., Огонеров В.В., Ефремов В.С.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, anna.interpol@yandex.ru

Аннотация. В докладе на основе исследований, выполненных в 2025 г., и анализа фондовых материалов приведена характеристика химического состава озер и холодных подземных рассолов Кемпендяйской впадины. Рассмотрены особенности распределения температуры в толще воды и донных отложениях в соленых озерах. Обосновывается необходимость продолжения гидрохимических и геотермических наблюдений для изучения особенностей формирования и продолжительности существования аномально теплого слоя в соленых водоемах, питающихся подземными рассолами.

Ключевые слова: соленые озера, разгрузка подземных вод, рассолы, температурная аномалия, гелиотермальные озера

Abstract. This article describes the chemical composition of lake water and cold underground brines of the Kempendyay depression based on fond data and research conducted in 2025. Temperatures were measured in the waters and bottom sediments of multiple brine lakes and one freshwater lake in the area. We conclude that highly mineralized lakes, fed by cold brine springs, require further hydrochemical and geothermal studies in order to determine how various environmental factors affect the formation of the abnormally warm layer and how lake water temperatures change over time.

Keywords: brine lakes, groundwater springs, underground brines, temperature anomaly, heliothermal lakes

Гелиотермальные озера, представляющие собой высокоминерализованные водоемы, в которых формируется аномально теплый слой рассола под слоем более холодной и пресной воды, впервые были изучены в Румынии в 1901 г. [11]. В оз. Урсу (Медвежье) максимальная температура теплого слоя воды составляла 69.5 °С на глубине 1.5 м [7]. На территории России одним из первых гелиотермальные озера описал R. Brecht-Bergen в 1908 г, обнаруживший их в Алтайском крае [6]. Природу данного явления исследователи объясняли следствием воздействия солнечного света на озера [2, 3, 11]. Залегающий на поверхности слой пресной воды обладает изоляционными свойствами и препятствует потере тепла из прогревающегося нижележащего слоя рассолов. Разница в плотности слоев предотвращает их смешение, в том числе конвективный теплоперенос. Это позволяет теплу накапливаться в верхней части слоя рассола, что приводит к аномально высокой температуре воды. Для проявления «парникового эффекта» минимальные различия в минерализации воды по разрезу должны превышать 15 г/дм³, и только стратифицированные по плотности хлоридные и сульфатные озера достигают этой величины [3]. Гелиотермальные озера встречаются и в арктических и в субарктических условиях, например оз. Ванда в Антарктиде с водой хлоридного кальциевого состава [12] и оз. Бонни с водой хлоридного натриевого состава [10].

Аномально повышенная температура воды в соленых озерах Якутии была зафиксирована экспедицией Московского института курортологии в Сунтарском районе в окрестностях с. Кемпендяй в 1932 г. Однако феномен гелиотермии на данной территории до сих пор мало освещен в литературе. Целью исследований было изучение химического состава и температуры воды Кемпендяйских соленых озер. Для этого в июле и сентябре 2025 г. проведены отбор проб вод из озер, источников подземных вод и водотоков, термометрия пяти озер и их донных отложений. Температуру измеряли термометрическим щупом длиной 2 м в верхнем 1-метровом отрезке через 0.1 м и далее через 0.2 м. Отбор проб воды и измерение температуры соленых озер Мохсоголлох и Туус-Кюель проводили в центральной части водоемов. Из-за вязкого и топкого дна озер Малый Рассол и Большой Рассол точки наблюдений были расположены в 1 м от уреза воды. В глубоком пресном оз. Сордонгнох измерения проводили с лодки в 15–20 м от берега. Для комплексного анализа природных условий использованы фондовые материалы ИМЗ СО РАН, результаты полевых исследований Ботубинской гидрогеологической экспедиции за 2002 г., а также литература.

Изучаемые озера находятся в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород мощностью 280–300 м. Глубина сезонного протаивания пород от 0.5 до 3.5 м. Средняя

месячная температура воздуха в самый холодный месяц (январь) составляет $-35 \dots -45$ °С, а в самый жаркий (июль) – $16-19$ °С, ее максимум в отдельные дни может повышаться до 38 °С.

В районе исследований развиты Кемпендйские солянокупольные структуры, сформировавшиеся в одноименной впадине. Соленосные породы представлены кыгылтуусской свитой позднедевонского возраста, сложенной пластами солей разной мощности с примесью глинистого и ангидрит-доломитового материала общей мощностью от 630 до 4000 м [4]. Над ними залегают отложения намдырской свиты (алевролиты и аргиллиты с прослоями песчаников, мергелей, глин и известняков, цеолитовых туфов). В сводовых частях солянокупольных структур породы брекчированные, перемятые. Их перекрывают четвертичные отложения мощностью от 1.6 в старичных низинах до 20–30 м на второй надпойменной террасе р. Кемпендй.

Соленые озера расположены на правом берегу р. Кемпендй. Поверхностный сток в реке существует с мая до ноября, редко – до марта. Среднегодовой многолетний расход реки $2.5 \text{ м}^3/\text{с}$. В период короткого весеннего половодья речные воды участвуют в питании изучаемых соленых озер, а летом и осенью сток направлен от озер к реке. Вода р. Кемпендй хлоридно-натриевая солоноватая с минерализацией $2-9 \text{ г/дм}^3$.

Озера имеют узкую подковобразную или петлеобразную форму. Их северные берега примыкают к склону второй надпойменной террасы, возвышающейся на 20–30 м выше уровня р. Кемпендй. Крутые склоны второй террасы и залесенность территории предотвращают ветровое перемешивание водной массы в озерах. Зимой соленые озера до дна не промерзают, несмотря на небольшую глубину (таблица).

Основные морфологические показатели изучаемых соленых озер

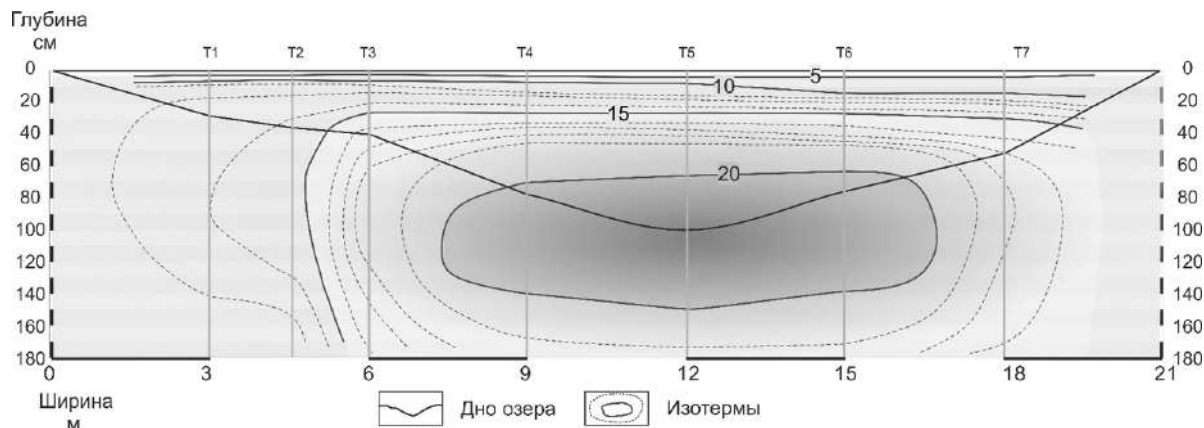
Название	Длина, м	Ширина, м	Площадь зеркала воды, м^2	Максимальная глубина, м [1]
Мохсоголлох	800	20–45	19274	2.7
Туус–Кюель	1700	8–40	32433	1.0
Малый Рассол	1700	15–35	9593	0.5
Большой Рассол	800	5–40	18350	0.7
Сордонгнох	851	766	543000	12.0

Высокая соленость озер и хлоридно-натриевый состав их воды связаны с питанием водоемов подземными рассолами, напорная фильтрация которых происходит по трещинам, окаймляющим купола соляных структур. На одном из участков субаэральной разгрузки рассолов действует сользавод, не одно столетие получающий галит методом естественного вымораживания самоизливающихся подземных вод. Суммарный дебит родниковой разгрузки рассолов и пробуренных рядом с ним двух фонтанирующих скважин – $4.8-6.8 \text{ л/с}$, температура воды $0.2-0.9$ °С, ее минерализация $290-320 \text{ г/дм}^3$, в химическом составе рассолов преобладают хлорид-ионы и ионы натрия, содержание которых составляет 99 %–экв.

Самое изученное из обследованных нами соленых озер – Мохсоголлох. Согласно фоновым материалам, летом 2002 г. в поверхностном слое минерализация его воды была $140-172 \text{ г/дм}^3$, а в придонном – $201-304 \text{ г/дм}^3$. При обследовании озера в 2025 г. его минерализация 25 июля равнялась $217-229 \text{ г/дм}^3$, а 20 сентября при глубине водоема 1.0 м она составляла в поверхностном слое воды 44 г/дм^3 , в среднем слое – 249 мг/дм^3 , в придонном – 239 г/м^3 . В 2025 г. 25 июля температура воздуха была 18.5 °С. В этот день максимальная температура воды (37.7°) в озере зафиксирована на глубине 1.0 м (при толщине слоя воды 1.4 м в точке замера), тогда как на поверхности водоема ее величина составила 25.1 °С, а у дна – 25.6 °С. 20 сентября температура воздуха была 2.5 °С. По поперечному профилю оз. Мохсоголлох самая высокая температура его воды ($20.5-21.7$ °С) наблюдалась в центральной части водоема с глубины 0.6 м и прослеживались ниже его дна (рисунок).

В 1.5 км на северо-восток от оз. Мохсоголлох находится оз. Туус–Кюель. Летом 2002 г. минерализация этого озера колебалась в пределах $187-212 \text{ г/дм}^3$. В 2025 г. 27 июля после

обильного дождя минерализация поверхностного слоя воды была 39.6 г/дм^3 , а 20 сентября в этом же месте – 297 г/дм^3 . В 2025 г. в июле температура воды поверхности оз. Туус-Кюель была 22°C , максимальная (29°C) отмечена на глубине 0.2 м (глубина озера в точке замера 0.32 м), а в донных иловых отложениях 26°C . В сентябре уровень воды в озере понизился на 0.23 м относительно его положения в июле. Осенью прослеживалось постепенное увеличение температуры с глубиной: от 10.6°C в слое воды до 16.5°C ниже дна озера.



магниево-кальциевого состава. Аналогичный химический состав имеют правобережные притоки р. Кемпендйя, впадающие ниже соленых озер по течению реки. В юго-восточной части из оз. Сордонгнох вытекает руч. Тарынг. На территории с. Кемпендйя его минерализация в 2025 г. составляла 0.08 г/дм³, состав воды становится хлоридно-гидрокарбонатным, смешанным по катионам, вероятно за счет взаимодействия с горными породами. Летом температура воды оз. Сордонгнох постепенно понижалась от 20.5 °С на поверхности до 16.3 °С на глубине 1.5 м. В сентябре 2025 г. замеры показали равномерное увеличение температуры с глубиной: от 7.0 °С на поверхности до 10.4 °С на глубине 1.7 м.

Таким образом, несмотря на разгрузку в озера Мохсоголлох, Малый и Большой Рассол, Туус-Кюель холодных подземных рассолов с температурой 0.2–0.9 °С, вода в озерах летом аномально теплая. Появление термоклина в водоемах является следствием гелиотермального эффекта, который наиболее проявлен в озерах Мохсоголлох и Туус-Кюель. В зимний период за счет высокой минерализации в озерах возможно существование воды, переохлажденной до отрицательных температур. В Западной Якутии широко распространены отработанные карьеры, заполненные подмерзлотными рассолами. Расположение в ограниченных со всех сторон затопленных горных выработках защищает эти воды от ветрового перемешивания, и с достаточным притоком пресной воды (из сезонноталого слоя пород, атмосферных осадков) вероятно, что гелиотермический эффект может проявляться и в данных техногенных водоемах. Уже зарегистрирован факт появления гелиотермического эффекта в высокоминерализованных водоемах, занимающих бывшие горные выработки (Домбровский карьер, Украина [8]; Хот Лейк, Вашингтон, США [5]; Tully Valley Solar Pond, Нью Йорк, США [9]).

Список литературы

1. Аржакова С. К., Жирков И. И., Кусатов К. И., Андросов И., Реки и озера Якутии. Якутск: Бичик, 2007. 136 с.
2. Дзенс-Литовский А.И. Методы комплексного исследования и разведки озерных соляных месторождений. Труды ВНИИИГ, вып. XXXIV. Л.: Гос. Научно-техническое изд-во химической литературы, 1957. 215 с.
3. Егоров А.Н. Энергетическая система соленых озер с "парниковым эффектом" // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2015. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2015. С. 311–317.
4. Соляная тектоника Сибирской платформы / Отв. ред. Ю.А. Косыгин. Труды Института геологии и геофизики. Вып. 65. Новосибирск: Наука, 1973. 166 с.
5. Anderon G.C. Some limnological features of a shallow saline meromictic lake // *Limnology and Oceanography*, 1958. 3. P. 259–270.
6. Brecht-Bergen R. Das Salz- und Bitterseengebiet ztuisdien Irtysch und Ob // *Globus*, Bd. XCIII, 1908, No. 9. S. 133–139.
7. Dér Illyés–Teich bei Szováta und seine Umgebung von geologischem Gesichtspunkte // *Földt. Közi. XXIX. L. Roth v. Telegd.* 1899. P. 130–134.
8. Haydyn A., Dyakiv Vasyi, Romanyuk, Nataliya, Volodymyr Kozlovskyy. Physicochemical and biological parameters of Dombrovske Pit Lake – legacy of opencast potassium salt mine (Kalush, Ukraine). *Studia Biologica*. 2020. P. 57–68.
9. Hayhurst Brett, Kappel W.M. Natural Heat Storage in a Brine-Filled Solar Pond in the Tully Valley of Central New York: U.S. Geological Survey Open-File Report. 2013. 1266. 14 p.
10. Hoare R.A. et all. Lake Bonney, Taylor Valley, Antarctica: a Natural Solar Energy Trap // *Nature*. 1964. Vol. 202, № 4935. P. 886–888.
11. Kalecsinszky S. A Szováta meleg és forró konyhasóstavakról mint természetes hőaccumulátorokról. Meleg sóstavak és hőaccumulátorok előállításáról, *Földrajzi Közlemény, XXXVII*, Budapest, 1901. Sz. 450–469/
12. Wilson A.T., Wellman H.W. Lake Vanda: An Antarctic Lake: Lake Vanda as a Solar Energy Trap // *Nature*. 1962. Vol. 196? № 4860. P. 1171–1173.

ТИПИЗАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД МЕЖГОРНЫХ ВПАДИН ЗАБАЙКАЛЬЯ И ПРИБАЙКАЛЬЯ

Потапова Е.Ю.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
ЗАО «Геолинк-Консалтинг», Potapova081962@mail.ru

Аннотация. Проведена типизация месторождений подземных вод межгорных впадин Забайкалья и Прибайкалья, расположенных в пределах Восточно-Сибирской гидрогеологической складчатой области. Типы месторождений, приуроченных к межгорным впадинам, определяются как структурно-тектоническими особенностями и размерами структур, так и геокриологическими условиями, причем мерзлотный фактор зачастую является самым значимым.

Ключевые слова: подземные воды, межгорные впадины, запасы, ресурсы, многолетнемерзлая толща

Abstract. The paper considers the typification of groundwater deposits in the Zfbaikalia and the Baikalia intermontane basins of, which are located within the East Siberian hydrogeological folded area. The types of deposits in the intermontane basins are determined by both structural and tectonic features and the size of the structures, as well as by the geocryological conditions.

Keywords: groundwater, intermountain depressions, reserves, resources, and permafrost

В гидрогеологическом отношении территория Прибайкалья и Забайкалья входит в состав Восточно-Сибирской гидрогеологической складчатой области (ГСО), которая разделяется на Байкальский и Забайкальский гидрогеологические складчатые районы. Основными элементами являются гидрогеологические массивы (ГМ), приуроченные к горным хребтам и артезианские бассейны (АБ), соответствующие межгорным впадинам.

Вопросами типизации (классификации) межгорных структур региона занимались многие известные специалисты, в том числе Н.И. Толстихин, Н.А. Флоренсов, Е.В. Пиннекер, В.Г. Ясько, К.П. Караванов и другие. В работах авторов [1–4] рассматривается характеристика межгорных впадин без учета формирования в них месторождений пресных подземных вод (МППВ). Кроме этого, основным недостатком типизаций является то, что в должной мере не учитывается характер и морфология мерзлых толщ, в то время как мерзлотный фактор самый значимый в формировании различных типов (подтипов) МППВ.

При изучении гидрогеологических условий формирования и размещения МППВ принципиально важно учесть три фактора:

1. литолого-фациальный фактор, позволяющий разделить впадины на байкальские и забайкальские типы [5], различающиеся фильтрационными средами и закономерностями пространственного изменения их параметров;

2. геолого-структурный фактор (тектонический), отражающий размеры и, как правило, мощность отложений чехла структур. По этому фактору среди байкальских и забайкальских впадин можно выделить крупные (более 1000 км²), средние и малые (менее 100 км²). Учет этого фактора определяет мощность отложений и строение разреза, условия питания (площади потенциального питания в крупных впадинах естественно больше, чем в малых), движения (пути движения подземных вод в малых впадинах короче), разгрузки (ее более концентрированный характер имеет место в малых впадинах) подземных вод;

3. мерзлотный фактор, различно проявляющийся как в байкальских, так и в забайкальских межгорных впадинах, что позволяет по этому фактору провести градацию. Выделены структуры с прерывистым и островным типом ММТ. Мерзлотный фактор необходимо рассматривать в связи с тем, что он определяет формирование гидрогеологических условий, а именно характер питания (в структурах со сплошной мерзлотой практически отсутствует площадное питание подземных вод атмосферными осадками; во впадинах, где мерзлые породы локализованы под руслами рек затрудняется связь последних с подземными водами); пути и характер движения подземных вод также определяются положением мерзлых толщ в разрезе и по площади (во впадинах со сплошной мерзлотой подземные воды имеют напорный характер, с островным типом мерзлоты –

напорно-безнапорный или безнапорный); наконец, положение участков разгрузки подземных вод определяется «мерзлотными барьерами».

Вышеназванные факторы находятся в теснейшей взаимосвязи. Сочетание этих «действующих» факторов отражается в формировании гидрогеологических условий и закономерностей их проявления и, таким образом, может быть основой для гидрогеологической типизации структур и выделения в них типов (подтипов) МППВ.

В сложных гидрогеологических условиях, характерных для межгорных впадин, организация поисков, разведки и оценки запасов МППВ имеет специфические трудности, связанные с необходимостью изучения широкого круга вопросов (фильтрационные свойства и параметры, границы, положение и влияние мерзлотных толщ, таликовых зон и др.). В этих условиях разработка обоснованной типизации МППВ, учитывающей все особенности их фильтрационных схем и структуры эксплуатационных запасов, позволяет в определенной мере сократить задачи разведки и, соответственно, снизить затраты. Отнесение того или иного МППВ к тому или иному типу (в соответствии с предлагаемой типизацией) может рассматриваться в качестве первой стадии (поисков), которая обеспечивает представление о видах и составе разведочных работ на последующих стадиях.

При широком разнообразии геолого-структурного и литолого-фациального строения межгорных впадин Забайкалья и Прибайкалья особенности их гидрогеологических условий и, как следствие, условий формирования и размещения месторождений подземных вод в решающей степени определяются мерзлотным фактором (распространение, мощность и положение в разрезе многолетнемерзлых пород). Именно мерзлотный фактор в значительной степени определяет строение гидрогеологического разреза, типы потоков подземных вод и их структуру, внутренние и внешние границы потоков, связанные с участками сосредоточенного питания и разгрузки подземных вод, положение которых, как правило, определяется развитием мерзлых толщ.

В то же время наличие участков сосредоточенного питания и разгрузки, особенно в условиях прерывистого развития мерзлоты, связанных с таликами (инфильтрационные, напорно-фильтрационные и другие), определяется именно гидрогеологическими условиями межгорных впадин, поскольку талые зоны, как правило, связаны с участками повышенной проницаемости разреза, а также отепляющим воздействием потоков подземных вод.

Все многообразие месторождений пресных подземных вод, приуроченных к межгорным впадинам Забайкалья и Прибайкалья, может быть сведено к восьми основным типам (подтипам), различающимся условиями формирования и структурой эксплуатационных запасов подземных вод. Различия выделенных типов (подтипов) наиболее четко проявляются при обосновании фильтрационной схемы месторождения, отражающей распределение фильтрационных параметров среды, тип и характеристику внутренних и внешних границ, тип и структуру потока.

Разведка и оценка запасов месторождений предполагают содержательный анализ основных факторов их формирования, что в конечном счете реализуется в составлении фильтрационной схемы МППВ, которая отражает граничные условия, параметры среды, структуру потока в пространстве и во времени, а также рациональный тип водозаборного сооружения. Все эти позиции теснейшим образом связаны между собой.

Типизация месторождений подземных вод межгорных впадин Восточно-Сибирской гидрогеологической складчатой области представлена в таблице.

Результаты обобщения фильтрационной схематизации гидродинамических условий и диапазоны параметров проводимости основаны на предметном анализе данных по разведкам и оценкам запасов на исследуемой территории, проведенном в 1970–1990 гг. Данные по разведочным и оценочным работам были собраны автором в территориальных фондах и подвергнуты комплексному анализу. Автор непосредственно принимал участие в разведке и оценке запасов по нескольким месторождениям Забайкалья, которые проводились 20-й экспедицией ПГО «Гидроспецгеология».

Типизация месторождений подземных вод межгорных впадин Восточно-Сибирской гидрогеологической складчатой области

ТИП	ПОДТИП		Вид	Характерные примеры	Тип МППВ	Фильтрационная схематизация					Структура запасов	
						Про- води- мость (м ² /сут)	Границы		Структура потока			
							Внеш- ние	Внут- рен-ние				
БАЙКАЛЬСКИЕ	с прерывистой ММТ	I	крупные, более 1000 км ²	1	Чарская, Муйская, Верхнеангарская, Баунтовская, Верхнемуйская, Улан-Иакитская	A	в сквозных таликах под реками с постоянным стоком	более 10000	мерз- лотные	реч- ные	плано- вая	-
						B	глубоких подмерзлотных водоносных горизонтах	нет сведе- ний	струк- турные	реч- ные	плано- вая	EЗ (EP)
						B	в таликах прибортовых конусов выноса	300–500	струк- турные	реч- ные	трех- мерная	EP
			средние, 100–300 км ²	2	Ингамакитская, Верхнекапарская, Кокоревская, Сюльбанская	A	в сквозных пойменно- русловых таликах под реками с периодическим стоком	10000– 15000	мерз- лотные	реч- ные	-	EP (ПР)
			малые, менее 100 км ²	3	Асиндинская, Амутская	МППВ промышленного типа не предполагается, малые мощности, низкие фильтрационные свойства отложений; сплошное строение ММТ						
БАЙКАЛЬСКИЕ	с островной ММТ	II	крупные, более 1000 км ²	1	Кичерская, Баргузинская, Усть-Баргузинская	A	в речных долинах	20000– 30000	литоло- гичес- кие	реч- ные	плано- вая	ПР
						B	в конусах выноса	менее 500	литоло- гичес- кие	-	трех- мерная	EP
							средние, 100–200 км ²	2	Хаимская, Котокельская	A	в водоносных комплексах рыхлых отложений	менее 500
		III	крупные, более 200 км ² до 700–800 км ²	1	Укшумская, Амалат-ская, Джидинская, Зазинская, Тунгирская, Керенгская, Усуглинс-кая, Еравнинская, Бутуйская, Зазинская, Хоринская	A	в подмерзлотных водоносных горизонтах	100– 1500	струк- турные	-	плано- вая	EЗ (EP)
						B	в подрусловых несквозных таликах	менее 1000	мерз- лотные	реч- ные	трех- мерная	EP (ПР)
	малые, менее 100 км ²	2	Джеловунская, Оиктинская	МППВ промышленного типа не предполагается, малые мощности, низкие фильтрационные свойства отложений; сплошное строение ММТ								
ЗАБАЙКАЛЬСКИЕ	с островной ММТ	IV	крупные $\approx$ 300 км ² ММТ на водоразде- лах IVд	1	Читино-Ингодинская, Чикойская, Карымская, Шилкинская, Оловская	A	в подмерзлотных водоносных горизонтах	300–500	струк- турные	реч- ные	плано- вая	EЗ (EP)
						B	в речных долинах	1000– 2000	струк- турные	реч- ные	плано- вая	EP (ПР)
							крупные $\approx$ 300 км ² ММТ в долинах IVв		Тургинская, Западно- и Восточно- Урулунгуйские, Удино-Даянская	A	в водоносных горизонтах рыхлых отложений	1000– 10000
			малые, менее 100 км ²	2	Никишихинская, Маккавеевская, Кручининская, Оленгуйская, Кодинские, Уреинская	A	в артезианских водоносных горизонтах	300–500	струк- турные	-	плано- вая	EЗ (EP)

Примечание. * – EP – естественные ресурсы; EЗ – естественные запасы; ПР – привлекаемые ресурсы.

Формирование Байкальского рифта определило структурно-гидрогеологические условия Байкальского региона и в целом тип коллектора. Байкальские межгорные впадины (бассейны межгорных впадин кайнозойского возраста) отделяются от забайкальских (адартезианские бассейны, вулканогенные супербассейны) Монголо-Охотским тектоническим швом. Однако именно наличие многолетней мерзлоты различного типа (сплошной, прерывистый, островной долинный и водораздельный) как для байкальских, так и для забайкальских впадин является значимым фактором для формирования месторождений пресных подземных вод.

Результаты исследований показали, что для большинства типов (подтипов) месторождений подземных вод, приуроченных к межгорным впадинам Забайкалья и Прибайкалья, структура эксплуатационных запасов полностью или в значительной степени определяется естественными ресурсами подземных вод (инверсия разгрузки). В связи с этим одной из основных задач, которые должны решаться при разведке и подсчете запасов, является количественная оценка внутригодовой и многолетней изменчивости величин питания и разгрузки подземных вод (русловое поглощение, родниковая и русловая разгрузка, «наледная» разгрузка). Особую актуальность эта задача приобретает для ограниченных по размерам структур.

В связи со значительной ролью криогенного фактора важнейшей задачей на всех стадиях поисков и разведки месторождений в межгорных впадинах Забайкалья и Прибайкалья является изучение криогенного строения разреза: характера распространения и мощности мерзлых пород, положения талых зон, а также их типа и условий формирования.

Список литературы

1. Борисенко И.М., Адушинов А.А., Литвиненко Т.Е. Месторождения подземных вод горно-складчатых областей на примере Прибайкалья и Западного Забайкалья. М.: Наука, 1990. 121 с.
2. Караванов К.П. Основы типизации межгорных артезианских бассейнов востока СССР: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук (04.00.06). Хабаровск, 1988. 48 с.
3. Кочнева В.Г. Формирование месторождений пресных подземных вод в осадочных отложениях мезозойских впадин Западного Забайкалья: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук (25.00.07). Улан-Удэ, 2003. 212 с.
4. Пиннекер Е.В. Проблемы региональной гидрогеологии. Закономерности распространения и формирования подземных вод. М.: Наука, 1977. 196 с.
5. Флоренсов Н.А. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. М.-Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1960. 177 с.

СУБАКВАЛЬНАЯ РАЗГРУЗКА ПОДМЕРЗЛОТНЫХ ВОД В ПОДРУСЛОВОЙ ТАЛИК Р. ВИЛЮЙ НА ГРАНИЦЕ ЫГЫАТТИНСКОЙ ВПАДИНЫ И СУНТАРСКОГО СВОДА

Федоров М.А., Павлова Н.А., Федоров А.А.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, FedorovMA@mpi.ysn.ru

Аннотация. На основе анализа и интерпретации фондовых и опубликованных материалов рассмотрены особенности строения подруслового водоносного комплекса р. Вилуй и химический состав его воды на отрезке от с. Сюльдюкар до г. Нюрба. Выявлено, что в зоне сочленения Ыгыаттинской впадины и Сунтарского свода подрусловые воды обладают высокой минерализацией (до 47 г/дм³) и повышенными концентрациями отдельных микроэлементов, характерных для соленых подмерзлотных вод региона. Здесь же отмечается сравнительно меньшая мощность ледового покрова и пониженная температура речной воды относительно смежной территории. Вышеперечисленное указывает на наличие в районе с. Крестях сквозного напорно-фильтрационного талика.

Ключевые слова: Вилуй, подрусловой талик, подмерзлотные воды, кембрийский водоносный комплекс, субаквальная разгрузка, химический состав

Abstract. This article presents an analysis of fond and published data on the structure of the Viluy river talik and the chemical composition of its waters on in the section between Syuldyukar and Nyurba. It was determined that in the junction of the Ygyattinskaya depression and the Suntarskoe uplift the waters of the Viluy river talik have a high mineralization (up to 47 g/L) and heightened concentrations of certain trace elements specific to subpermafrost brines of this region. The area is also characterized by a smaller ice cover thickness and lower river water temperature compared to the adjacent area. The aforementioned features indicate a presence of a through pressure-filtration talik in the region near Krestyakh.

Keywords: Viluy river, river talik, subpermafrost water, Cambian aquifer complex, subaqueous discharge, chemical composition

На территории Западной Якутии использование в питьевых целях подмерзлотных вод ограничивает их высокая минерализация, а вод подозерных таликов – проблематичность организации зон санитарной охраны и небольшие запасы подземных вод. В этих условиях в качестве альтернативных источников водоснабжения могут рассматриваться водоносные комплексы, распространенные в пойме и под руслом р. Вилуй. В процессе поисково-оценочных работ на подземные воды под р. Вилуй, которые проводились в основном вблизи наиболее крупных населенных пунктов (г. Нюрба, с. Верхневилуйск и г. Вилуйск), было выявлено, что гидрогеологические условия в долине реки сложные, а водообильность скважин напрямую зависит от мощности четвертичных образований и их литологического состава.

Целью исследований являлась оценка современных мерзлотно-гидрогеологических условий долины р. Вилуй на территории Сунтарского района Республики Саха (Якутия). Для этого были собраны и проанализированы материалы геологоразведочных работ АО «Якутскгеология» и научных исследований Института мерзлотоведения СО РАН, полученных в 2014–2023 гг. В этот период в пойме р. Вилуй на территории населенных пунктов Хордогой, Нахара, Крестях, Куокуну, Сарданга, Сунтар и Устье Сунтарского района (рисунок), а также на смежной площади в с. Сюльдюкар (Мирнинский район) и с. Кюндядя (Нюрбинский район) был проведен комплекс гидрогеологических исследований, который включал бурение скважин глубиной до 100 м в пойме реки и первой надпойменной террасе, опытно-фильтрационные работы, наблюдения за уровнем подрусловых вод р. Вилуй и их гидрохимическое опробование.

Река Вилуй по условиям формирования водного режима относится к восточно-сибирскому типу, для которого характерны высокое весеннее половодье, частые летние паводки и очень низкая зимняя межень. У с. Сунтар средний годовой расход реки 787 м³/с. В пределах рассматриваемого района ширина долины р. Вилуй 3–4 км при ширине русла 200–600 м. Глубина реки от 1.5 до 8.5 м, а высота коренных берегов до 150 м [7].

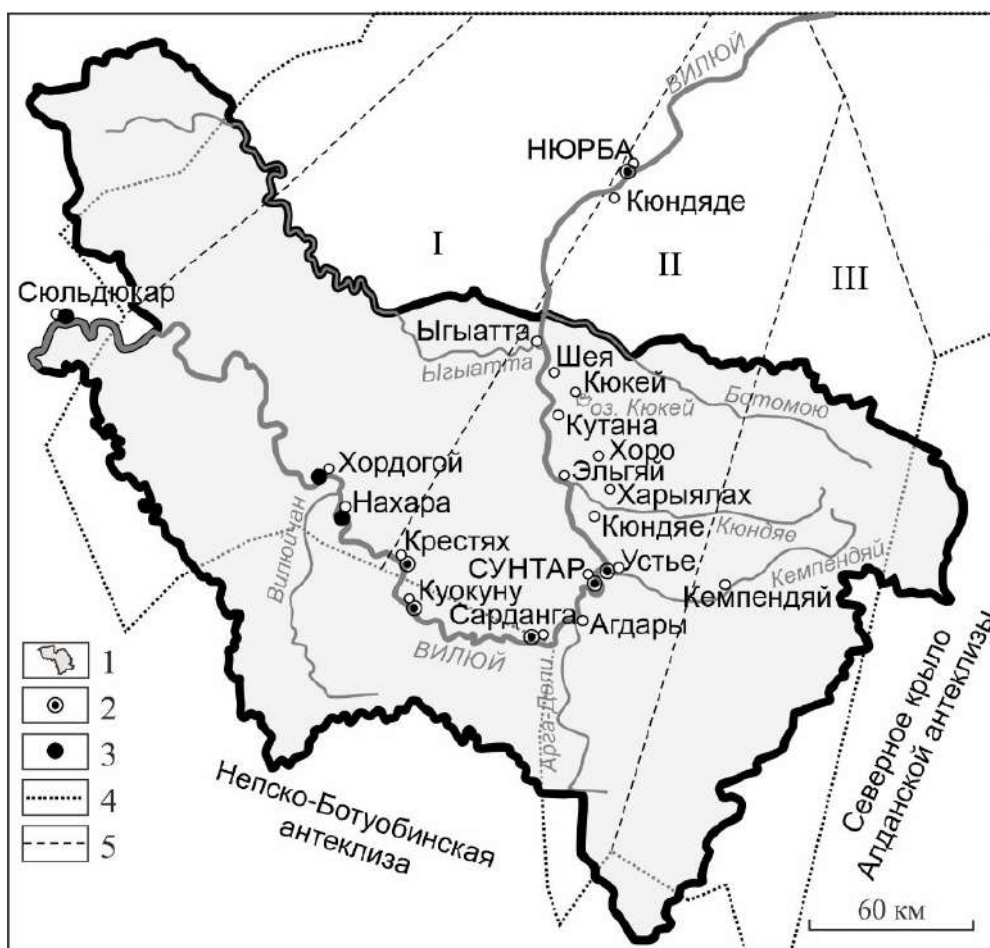


Схема расположения поисковых скважин на воду в районе исследований: *I* – территория Сунтарского района; *2* – скважина, не вскрывшая подземные воды; *3* – гидрогеологическая скважина, вскрывшая подрусловый водоносный комплекс; *4* – граница Вилуйской синеклизы; *5* – границы тектонических структур второго порядка; *I–III* – геологические структуры: *I* – Ыгыаттинская впадина; *II* – Сунтарский свод; *III* – Кемпендяйская впадина.

На изучаемой площади р. Вилуй пересекает два тектонических блока – Ыгыаттинскую впадину и Сунтарский свод [6]. Тектонические блоки отделены друг от друга системой разломов северо-восточного простирания амплитудой до нескольких километров. Один из них пересекает р. Вилуй в районе с. Крестях. Здесь же имеется единственный на реке порог – Соколиный. Ыгыаттинская впадина сложена терригенно-карбонатными галогенными отложениями кембрия и девона, перекрытыми юрскими терригенными образованиями общей мощностью 6 км [4]. По данным бурения поисковых скважин на воду, в районе с. Крестях глубина залегания палеозойских отложений составляет 31–41 м, тогда как на смежной территории скважины глубиной 100 м вскрыли четвертичные и юрские породы.

В пределах рассматриваемой территории регионально распространенные водоносные комплексы залегают под многолетнемерзлыми породами на глубине 300–500 м и содержат соленые подземные воды и рассолы [2, 3]. Например, на площади Сунтарского свода в с. Сунтар и с. Кюндяе с глубины 339–351 м в нижнеюрских и кембрийских отложениях скважинами вскрыты подмерзлотные воды хлоридного кальциево-натриевого состава при минерализации 7.3–17.0 г/дм³. В г. Нюрба в отложениях нижней юры под многолетнемерзлыми породами мощностью 495 м подмерзлотные воды хлоридно-натриевого состава имеют минерализацию 9.2 г/дм³. В литературе имеются отрывочные сведения об источниках соленых вод в пределах Сунтарского свода в низовьях р. Тэнкэнская Нючюкю и по р. Вилуй ниже с. Крестях [5]. Сведения о подмерзлотных водах в пределах Ыгыаттинской впадины отсутствуют. В Кемпендяйской впадине, примыкающей с востока к Сунтарскому

своду и имеющей одну историю развития с Ыгыаттинской впадиной [5, 6], известны естественные выходы подмерзлотных рассолов с минерализацией более 300 г/дм³ хлоридно-натриевого состава. Этот факт и широкое распространение криопэгов на смежной территории дают основание сделать заключение о высокой минерализации подмерзлотных вод Ыгыаттинской впадины.

Подрусловой таликовый комплекс р. Виллой вскрыт единичными скважинами. На трех участках (в окрестностях сел Сюльдюкар, Нахара и Хордогой) скважины, пробуренные в пойме реки, вскрыли четвертичные отложения и постилающие их юрские песчаники в многолетнемерзлом состоянии. В районе с. Крестьях в 1989 г. Ботуобинской геологоразведочной экспедицией в пойме реки двумя поисковыми скважинами вскрыты талые водоносные трещиноватые доломиты кембрийского возраста с глубины 23 и 31 м. Водоносный горизонт прослежен до забоя скважин (глубина 62 и 44 м). По химическому составу подземные воды хлоридно-натриевые с минерализацией 41–47 г/дм³. Аналогичные по химическому составу подземные воды обнаружены ниже по течению р. Виллой в с. Куокуну. Они вскрыты в интервале глубин 15.8–104.7 м. Водовмещающие породы – пески, песчаники и алевролиты четвертичного и юрского возраста. Поскольку скважинами, пробуренными на первой надпойменной террасе р. Виллой, талые породы не обнаружены, можно считать, что площадь распространения талика контролируется русловой частью реки, а его питание происходит в основном за счет речных вод.

В 2020–2021 гг. в пойме р. Виллой в районе сел Сарданга, Сунтар и Устье скважинами глубиной по 100 м вскрыт локально-водоносный криогенно-таликовый четвертично-юрский терригенный комплекс. Его кровля залегает на глубине 22.0, 14.1 и 9.0 м, а подошва – 54.0, 29.2 и 60.5 м соответственно. Подземные воды подруслового талика напорные. Их близкие абсолютные отметки и синхронный ход изменений пьезометрического уровня с уровнем воды р. Виллой свидетельствуют о тесной гидравлической связи речных вод с подземными водами вскрытого скважинами комплекса.

Поверхностные воды р. Виллой в районе исследований весьма пресные, минерализация их не превышает 166 мг/дм³. По классификации О.А. Алекина речные воды относятся к гидрокарбонатному классу, группе кальциевых и магниевых вод, второму типу [1]. Исключением является участок у с. Устье, где минерализация воды р. Виллой повышается до 500 мг/дм³ за счет притока в реку соленых хлоридно-натриевых вод р. Кемпендэй. По значению водородного показателя (рН = 6.2–7.5) вода р. Виллой обладает нейтральной реакцией, по величине общей жесткости – очень мягкая. По органолептическим показателям речные воды не имеют запаха. Отмечается их несоответствие требованиям, предъявляемым к питьевым водам из-за повышенных значений цветности, мутности и окисляемости.

В отличие от поверхностных вод, подземные воды подруслового талика р. Виллой обладают повышенной минерализацией, которая постепенно уменьшается по направлению от с. Крестьях до с. Устье от 47 до 14 г/дм³ (таблица). В этом же направлении наблюдается уменьшение концентрации лития (от 0.46 до 0.12 мг/дм³) и стронция (от 16.6 до 8.7 мг/дм³), характерных для подмерзлотных вод. Вода в талике принадлежит хлоридному классу, группе натрия, третьему типу. Увеличение отношения гNa/гCl от 0.7 до 1.6 и рост при этом гидрокарбонат-иона в подрусловых водах по течению реки свидетельствуют о нарастании разбавляющего эффекта соленых подземных вод за счет атмосферных осадков, поверхностных вод и вод сезонноталого слоя, обогащенных углекислотой.

Состав подрусловых вод у с. Сунтар наиболее близок к поверхностным водам, но минерализация воды в талике имеет повышенные значения – до 1.9 г/дм³. Доминирующими анионами являются гидрокарбонат-ионы при повышенном содержании сульфатов, преобладающий катион – натрий, тип воды по О.А. Алекину – первый. Реакция водной среды в подземных водах подруслового талика нейтральная (рН = 6.6–7.5). По органолептическим показателям, содержанию ионов натрия и хлорид-ионов вода из скважин у с. Сунтар не соответствует требованиям, предъявляемым к питьевым водам.

Химический состав поверхностных и подрусловых таликовых вод р. Виллой

Тип вод Участок	Подрусловые таликовые воды р. Виллой	Поверхностные воды р. Виллой
Сюльдюкар	не вскрыты	$M_{0.1} \frac{HCO_3^- 73SO_4^{2-} - 12Cl^- 15}{Ca^{2+} 50Mg^{2+} 31(Na^+ + K^+) 19} pH 7.0$
Хордогой	не вскрыты	$M_{0.1} \frac{HCO_3^- 70SO_4^{2-} - 15Cl^- 15}{Ca^{2+} 47Mg^{2+} 38(Na^+ + K^+) 15} pH 7.4$
Нахара	не вскрыты	$M_{0.1} \frac{HCO_3^- 70SO_4^{2-} - 15Cl^- 15}{Ca^{2+} 47Mg^{2+} 38(Na^+ + K^+) 15} pH 7.0$
Крестях	$M_{41.0} \frac{Cl^- 98SO_4^{2-} - 2}{(Na^+ + K^+) 76Ca^{2+} 13Mg^{2+} 11} pH 6.7$	$M_{0.1} \frac{HCO_3^- 75SO_4^{2-} - 14Cl^- 11}{Ca^{2+} 57Mg^{2+} 23(Na^+ + K^+) 19} pH 6.9$
Куокуну	$M_{41.0} \frac{Cl^- 98HCO_3^- 1SO_4^{2-} - 1}{(Na^+ + K^+) 84Mg^{2+} 9Ca^{2+} 7} pH \text{ н. о.}$	—
Сарданга	$M_{20.6} \frac{Cl^- 93SO_4^{2-} - 7}{(Na^+ + K^+) 83Ca^{2+} 9Mg^{2+} 8} pH 7.2$	$M_{0.1} \frac{HCO_3^- 60SO_4^{2-} - 22Cl^- 18}{Ca^{2+} 51(Na^+ + K^+) 25Mg^{2+} 24} pH 7.5$
Устье	$M_{13.4} \frac{Cl^- 73HCO_3^- 15SO_4^{2-} - 12}{(Na^+ + K^+) 83Mg^{2+} 4Ca^{2+} 13} pH 6.2$	$M_{0.5} \frac{Cl^- 84HCO_3^- 12SO_4^{2-} - 4}{(Na^+ + K^+) 85Ca^{2+} 11Mg^{2+} 4} pH 7.1$
Сунтар	$M_{1.9} \frac{Cl^- 53HCO_3^- 33SO_4^{2-} - 14}{(Na^+ + K^+) 85Ca^{2+} 12Mg^{2+} 3} pH \text{ н. о.}$	$M_{0.1} \frac{HCO_3^- 69Cl^- 20SO_4^{2-} - 11}{Ca^{2+} 54Mg^{2+} 30(Na^+ + K^+) 16} pH 7.1$
Кюндядя	$M_{0.5} \frac{Cl^- 49HCO_3^- 45SO_4^{2-} - 6}{(Na^+ + K^+) 44Ca^{2+} 36Mg^{2+} 20} pH 6.5$	$M_{0.1} \frac{HCO_3^- 59Cl^- 24SO_4^{2-} - 17}{Ca^{2+} 46Mg^{2+} 33(Na^+ + K^+) 21} pH 7.0$
Нюрба	$M_{0.2} \frac{HCO_3^- 77Cl^- 22SO_4^{2-} - 1}{(Na^+ + K^+) 88Ca^{2+} 12} pH 7.1$	$M_{0.1} \frac{HCO_3^- 74SO_4^{2-} - 14Cl^- 12}{Ca^{2+} 56Mg^{2+} 27(Na^+ + K^+) 17} pH 7.1$

Таким образом, подземные воды подруслового талика на изучаемом отрезке р. Виллой соленые и слабосоленоватые, содержат повышенные концентрации микрокомпонентов, характерных для подмерзлотных палеозойских галогенно-карбонатных водоносных комплексов. Вероятно, в районе с. Крестях, где кембрийские трещиноватые доломиты залегают наиболее близко к дневной поверхности, происходит разгрузка рассолов в подрусловой таликовый комплекс р. Виллой, шлейф от которой прослеживается по всем поисковым скважинам, расположенным ниже по течению до с. Устье и с. Сунтар. По мере удаления от с. Крестях отмечается опреснение вод таликового комплекса за счет разбавления речными водами. Так, уже в г. Нюрба Нюрбинского улуса РС(Я) подземные воды подруслового таликового комплекса р. Виллой становятся пресными. Косвенным свидетельством разгрузки подмерзлотных рассолов служат и результаты гидрологических работ, в ходе которых в районе с. Крестях отмечена минимальная толщина льда в зимний период и наиболее низкая среднемесячная температура речных вод в летний период.

Список литературы

1. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1953. 296 с.
2. Алексеев С.В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. 277 с.
3. Гидрогеология СССР, Т. XX, Якутская АССР / Гл. ред. А.В. Сидоренко. М.: Недра, 1970. 384 с.
4. Губин И.А., Конторович А.Э., Коровников И.В., Парфенова Т.М. Строение кембрийских отложений Виллойской гемисинеклизы по результатам комплексного анализа данных бурения и сейсморазведки // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 8. С. 1115–1131.
5. Михайлов М.В., Филатов В.Ф. К вопросу о возрасте Кемпендяйской и Ыгытинской впадин и Сунтарского погребенного горста // Геология и геофизика, 1965. № 7. С. 60–67.
6. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Ред. Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин. М.: Наука/Интерпериодика, 2001. 571 с.
7. Юмина Н.М., Терешина М.А. Многолетние изменения стока рек бассейна Виллой // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2017. № 6. С. 62–70.

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ И РЕЖИМА ИСТОЧНИКОВ ПРОМЕРЗАНИЯ

Шепелев В.В.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, sheply@mpi.ysn.r

Аннотация. Приведены результаты изучения особенностей образования, режима и оценка дебита уникальных родников, встречаемых только в области распространения многолетнемерзлых пород. Представлена обобщенная схема образования источников промерзания и рекомендуемые формулы для определения дебита подобных родников. Указывается, что процессы промерзания надмерзлотных водоносных слоев и горизонтов отражаются и на химическом составе родников.

Ключевые слова: *источники промерзания, многолетнемерзлые породы, режим родников, сезонное промерзание пород*

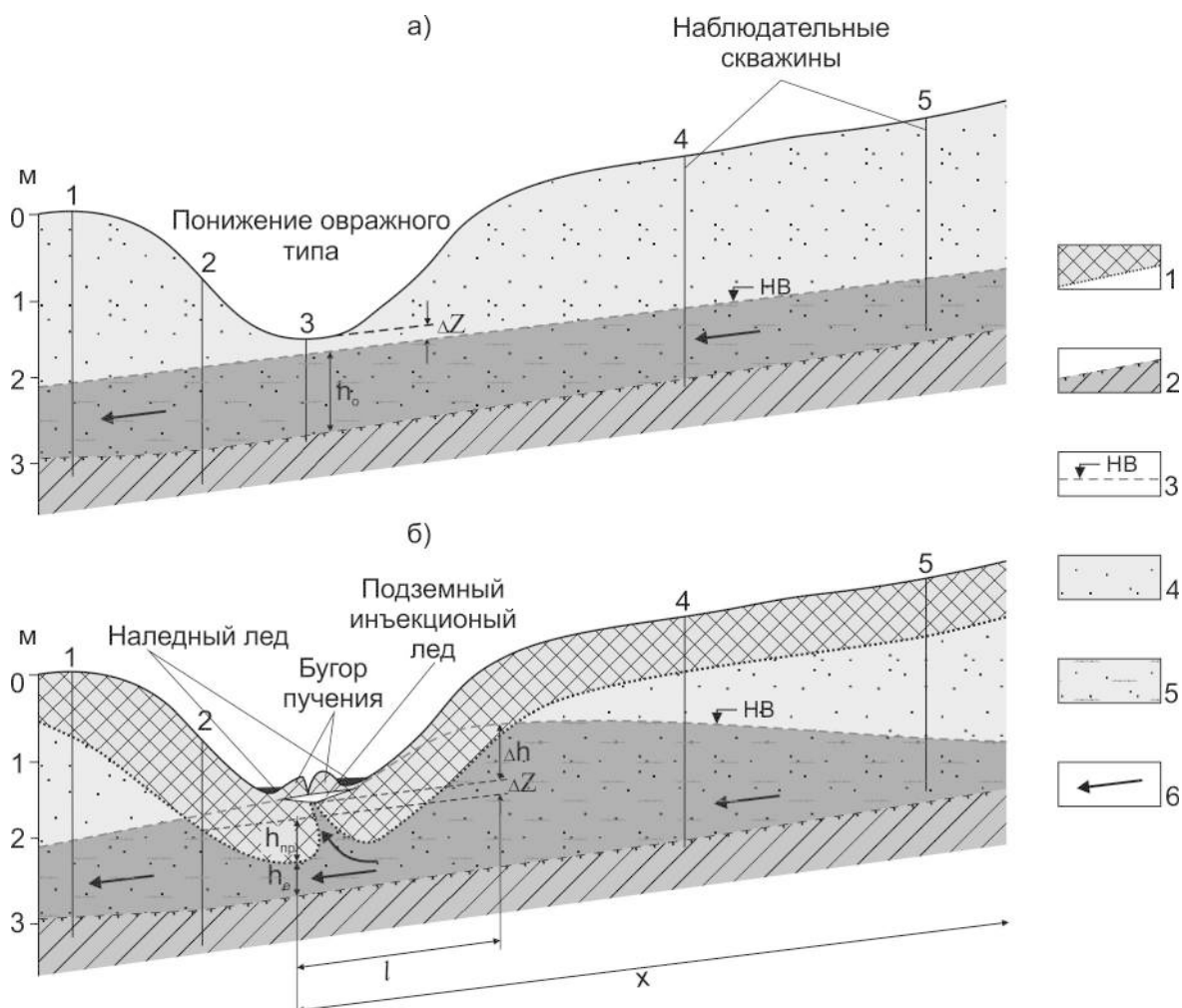
Abstract. The paper presents the results of a study of the formation characteristics, regime, and discharge assessment of unique springs found only in the permafrost area. A generalized scheme of the formation of frost-source springs is presented, along with recommended formulas for determining the discharge rate of such springs. It is noted that the freezing processes affecting suprapermafrost aquifers and horizons also influence the chemical composition of the springs.

Keywords: *freezing spring, permafrost, spring regime, seasonal freezing of soil*

Основные особенности разгрузки надмерзлотных вод криолитозоны связаны с воздействием геокриологических и климатических факторов на условия их формирования, питания и циркуляцию. Среди геокриологических факторов наиболее значительное влияние на условия выхода надмерзлотных вод на поверхность земли имеют процессы сезонного промерзания и протаивания горных пород. Так, Н.И. Толстихин в своей фундаментальной работе «Подземные воды мерзлой зоны литосферы» отмечал: «Только для районов распространения мерзлой зоны можно указать своеобразные условия появления подземной воды на поверхность, связанные с промерзанием или оттаиванием водоносных путей. Эти оригинальные источники промерзания и оттаивания неизвестны для других районов» [6, с. 126].

Источники промерзания могут формироваться как надмерзлотными водами сезонноталого слоя, так и надмерзлотными грунтовыми водами [8]. По характеру изменения гидрогеодинамических условий под воздействием процессов сезонного промерзания подобные источники относятся к подпорному типу, поскольку их образование связано с сокращением площади поперечного сечения потока надмерзлотных вод и формированием подпорной зоны их уровня. Функционирование источников промерзания начинается спустя определенный период после установления устойчивых отрицательных средних суточных температур воздуха. Продолжительность этого периода зависит в основном от глубины залегания уровня надмерзлотных вод, значений отрицательных температур воздуха и количества твердых атмосферных осадков в начале зимнего сезона. Возникновению открытой разгрузки надмерзлотных вод предшествует обычно образование бугров пучения, через которые и происходит в последующем излив подземной воды на дневную поверхность.

Дебиты источников промерзания, как правило, незначительные и составляют сотые, реже десятые доли единиц литров в секунду. Ввиду небольших дебитов действуют подобные источники преимущественно периодически. После излива определенного объема подземной воды и снятия в результате этого гидростатического криогенного напора наступает период временного затишья. За этот период происходит промерзание сверху водовыводящих трещин в буграх пучения и постепенное повышение уровня надмерзлотных вод на данном участке. Повышение уровня происходит до тех пор, пока гидростатическое давление в зоне подпора не превысит прочность новообразованного слоя промерзания в водовыводящей части бугра пучения. После этого происходит вновь излив определенного объема подземной воды и снятие гидростатического напора.



Обобщенная схема образования источников промерзания надмерзлотных вод.

а – мерзлотно-гидрогеологическая обстановка в теплый период года; *б* – мерзлотно-гидрогеологическая обстановка в зимний период.

1 – слой сезонного промерзания горных пород; *2* – многолетнемерзлые горные породы и их граница; *3* – уровень надмерзлотных вод; *4* – талые неводоносные отложения; *5* – водоносные горные породы; *б* – направление движения надмерзлотных вод. (Другие обозначения см. в тексте).

Автором составлена обобщенная схема (рисунок) образования источников промерзания. Исходя из данной схемы, дебит подобных источников можно оценить по следующей формуле:

$$Q_{\text{пр}} = \frac{2\pi k_{\phi}(\Delta h + \Delta z) \cdot [2h_0 - (\Delta h + \Delta z)]}{\ln \frac{x}{l}}, \quad (1)$$

где k_{ϕ} – коэффициент фильтрации пород, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$, или $\text{м} \cdot \text{сут}^{-1}$; Δh – максимальная величина превышения подпорного уровня надмерзлотных вод над отметкой дна овражного понижения, м; h_0 – мощность потока надмерзлотных вод на участке овражного понижения в предзимний период, м; x – расстояние от места выхода надмерзлотных вод до точки влияния подпорного уровня, м; l – расстояние от источника до точки «водораздела» подпорной зоны уровня надмерзлотных вод; Δz – глубина залегания уровня надмерзлотных вод в наинижней точке рельефа местности в предзимний период.

Для выхода надмерзлотных вод на поверхность необходимо, чтобы гидростатическое давление, развиваемое в результате подпора надмерзлотного потока, превысило прочность на изгиб сезонно-мерзлой кровли на участке сужения площади надмерзлотного потока. Величину этого давления ($P_{\text{гст}}$, Па) можно приближенно рассчитать по следующему уравнению:

$$P_{\text{ест}} = (\Delta h + \Delta z) \gamma_{\text{в}} g \frac{x}{l}, \quad (2)$$

где $\gamma_{\text{в}}$ – объемный вес воды, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; g – ускорение силы тяжести, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$.

Так, приняв $\kappa_{\phi} = 2 \text{ м} \cdot \text{сут}^{-1}$, $\Delta h = 0.8 \text{ м}$, $\Delta z = 0.3 \text{ м}$, $h_o = 0.7 \text{ м}$, $x = 500 \text{ м}$ и $l = 30 \text{ м}$, используя уравнения (1 и 2), получим значение дебита источника промерзания равным $2.50 \text{ м}^3 \cdot \text{сут}^{-1}$, или 0.03 л/с , а величина давления на подошву деятельного слоя ($P_{\text{ест}}$) будет соответственно равна 0.18 МПа .

Несколько иные аналитические выражения для расчета дебита источников промерзания и величины гидростатического давления, развиваемого в результате подпора надмерзлотного потока, рекомендуются Е.А. Румянцевым [4], А.В. Сотниковым [5] и другими исследователями. Так, А.В. Сотников предлагает использовать следующую формулу для расчета удельного дебита источника промерзания, формируемого подземными водами на участке криогенного подпора их уровня:

$$q_{\text{ист}} = k_{\phi} m_0 J_0 - k_{\phi} m_{\tau} \left(J_0 + \frac{H_{\text{ст(г)}}}{l} - \frac{k_{\phi} m_0 H_{\text{ст(г)}}}{2\sqrt{a\tau}} \right), \quad (3)$$

где m_0 и J_0 – соответственно мощность и уклон грунтового потока до промерзания; m_{τ} – мощность грунтового потока на участке промерзания; $H_{\text{ст(г)}}$ – статистический уровень подземных вод на границе участка промерзания; l – длина участка промерзания; a – коэффициент пьезопроводности водовмещающих пород; τ – время промерзания.

В этом аналитическом выражении за основу расчета дебита источника берется изменение уклона подземных вод в зоне криогенного подпора их уровня, а также величина уменьшения мощности надмерзлотного потока на участке промерзания. Точно определить последнюю величину на практике весьма трудно ввиду пучения поверхности на участке разгрузки надмерзлотных вод и существования криогенного напора в промерзающем надмерзлотном водоносном слое или горизонте.

Источники промерзания, формируемые надмерзлотными водами сезонноталого слоя, прекращают свое существование обычно через 2–3 месяца после начала зимнего сезона. Связано данное обстоятельство в основном с незначительными ресурсами этих вод в зимний период. По местоположению источники промерзания, образуемые надмерзлотными водами сезонноталого слоя, приурочиваются часто к склонам южной экспозиции, прибрежным частям рек и озер, а также к другим понижениям, пересекающим движение этих вод.

Сезонное промерзание горных пород значительно влияет на разгрузку надмерзлотных грунтовых вод, обусловленную, например, геоморфологическими, литолого-фациальными, гидрологическими и другими природными факторами. Относить подобную разгрузку надмерзлотных вод к источникам промерзания нельзя, поскольку вызвана она другими причинами и осуществляется постоянно в течение года, то есть не является сезонной. Однако роль сезонного промерзания горных пород в изменении условий выхода надмерзлотных грунтовых вод на поверхность может быть весьма существенной. Помимо того, что сезонное промерзание способствует появлению криогенного напора и интенсифицирует разгрузку этих вод в зимний период, оно может вызвать сезонную и многолетнюю миграцию мест их выхода на дневную поверхность [2, 3, 6–9 и др.]

Относительно выделяемых Н.И. Толстихиным и другими исследователями источников оттаивания следует отметить, что по существу эти родники представляют собой разгрузку вод сезонноталого слоя, реже – надмерзлотной верховодки. Роль геокриологических факторов в формировании подобных источников подземных вод выражается в неравномерности протаивания пород деятельного слоя. Так, например, если на пути фильтрации надмерзлотных вод происходит резкое сокращение мощности сезоннопротаивающего слоя, то на таком участке возможно их выклинивание и образование сезонного летнего родника.

Процессы промерзания надмерзлотных вод сезонноталого слоя пород неизбежно отражаются и на химическом составе источников. Как показано исследованиями Н.П. Анисимовой, в процессе промерзания водонасыщенных пород происходит увеличение минерализации надмерзлотных вод вследствие концентрирования растворенных веществ [1].

При полном промерзании надмерзлотных вод более засоленным оказывается слой породы, промерзший в последнюю очередь. При протаивании этого слоя образующиеся в нем надмерзлотные воды обладают повышенной минерализацией, которая уменьшается после интенсивных дождей.

Наглядным примером влияния этих процессов на формирование химического состава источников надмерзлотных вод являются результаты многолетних исследований одного из родников, встречающихся на бестяхской песчаной террасе р. Лены в Центральной Якутии. Этот сезонный источник появляется в середине июня, в августе, как правило, он исчезает, и вновь появляется в сентябре после обильных дождей. Прекращает свое действие в октябре – ноябре, образуя небольшую наледь. Минерализация его воды бывает максимальной в июне и составляет в разные годы от 170 до 220 мг/дм³. В течение лета она постепенной уменьшается и в октябре изменяется от 75 до 150 мг/дм³. Изменение минерализации воды происходит в большей степени за счет содержания сульфат-ионов, ионов магния и натрия. Обогащение надмерзлотных вод сульфатами и магнием в июне происходит, вероятно, за счет растворения соли MgSO₄, которая может осаждаться из раствора при его промерзании. Летом активизируются процессы взаимодействия воды с породой, и под воздействием уголекислоты, содержащейся в атмосферных осадках и конденсационной воде начинается гидролитическое расщепление устойчивых в воде минералов, что приводит к повышению содержания ионов натрия.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований ИМЗ СО РАН «Подземные воды криолитозоны, особенности их взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами». Регистрационный номер в ЕГИСУ 1260205516689-6. Номер в ИС 0303-2026-0004.

Список литературы

1. Анисимова Н.П. Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск: Наука, 1981. 153 с.
2. Анисимова Н.П., Пигузова В.М., Толстихин О.Н., Шепелев В.В. Исследование режима источников подземных вод мерзлой зоны (на примере Центральной Якутии) // Региональные и тематические геокриологические исследования. Новосибирск: Наука, 1975. С. 116–123.
3. Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны. М.: Изд-во Московского ун-та, 1983. 232 с.
4. Румянцев Е.А. Влияние мерзлотно-гидрогеологических условий на динамику грунтовых наледей // Наледи Сибири. М.: Наука, 1969. С. 117–127.
5. Сотников А.А. Гидрогеологические процессы при строительстве в суровых климатических условиях. М.: Недра, 1984. 81 с.
6. Толстихин Н.И. Подземные воды мерзлой зоны литосферы. М.–Л.: Госгеолтехиздат, 1941. 203 с.
7. Толстихин О.Н. Наледи и подземные воды северо-востока СССР. Новосибирск: Наука, 1974. 163 с.
8. Шепелев В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2011. 169 с.
9. Шепелев В.В. Родниковые воды Якутии. Якутск: Кн. изд-во, 1987. 127 с.

SURFACE–WATER FINGERPRINTS OF GROUNDWATER MOBILIZATION UNDER PERMAFROST THAW

Liu S.¹, Wang P.^{1,2}, Yu J.^{1,2}, Pozdniakov S.P.³, Kazak E.S.³, Huang Q.^{1,2}

¹*Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China*

³*Lomonosov Moscow State University, Department of Hydrogeology, Moscow, liusq@igsnrr.ac.cn*

Аннотация. Потепление климата существенно трансформирует гидрологический режим Арктики, однако долговременные отклики подземных вод остаются недостаточно изученными. В работе проанализированы поверхностные индикаторы изменений подземного стока в шести крупнейших арктических речных бассейнах на основе длительных рядов данных по расходу воды, гидрохимическим и изотопным характеристикам (1980–2019 гг.). Полученные результаты показывают, что зимний сток, формируемый преимущественно за счет подземного питания, увеличивался более высокими темпами по сравнению со среднегодовым стоком, особенно в бассейнах с деградирующей многолетней мерзлотой, и характеризовался высокой чувствительностью к температуре воздуха. Усиление вклада подземных вод также обусловило значительный рост минерализации речных вод и выноса древнего углерода. Полученные данные свидетельствуют о том, что деградация многолетней мерзлоты приводит к реорганизации подповерхностных гидрологических процессов, что имеет важные последствия для качества вод арктических рек в условиях продолжающегося потепления климата.

Ключевые слова: Арктика, изменение климата, подземные воды, зимний сток, гидрохимия, многолетняя мерзлота

Abstract. Climate warming is reshaping Arctic hydrology, yet long-term groundwater responses remain poorly constrained. We analyzed surface–water indicators of groundwater change across six major Arctic river basins using long-term discharge, hydrochemical, and isotopic records (1980–2019). Results show that groundwater-dominated winter discharge increased more rapidly than annual flow, particularly in basins with degrading permafrost, and exhibited strong temperature sensitivity. Enhanced groundwater contributions also drove significant increases in river mineralization and export of aged carbon. These findings demonstrate that permafrost thaw reorganizes subsurface hydrology, with important implications for Arctic river water quality under continued warming.

Keywords: Arctic, climate change, groundwater, winter flow, hydrochemistry, permafrost

Climate warming has accelerated permafrost degradation, profoundly altering regional hydrological processes and environmental conditions across the Arctic [1]. Beyond the widely reported increases in river discharge, groundwater responses in Arctic river basins are often faster and exert a strong control on river water quality. However, long-term dynamics of groundwater change remain poorly constrained due to the difficulty of direct observations, leaving the mechanisms linking warming, groundwater flow, and riverine hydrochemistry insufficiently understood.

Here, we investigate surface–water fingerprints of groundwater change across six major Arctic river basins (Ob, Yenisei, Lena, Kolyma, Yukon, and Mackenzie) using daily discharge (Q , mm) data obtained from the Arctic Great Rivers Observatory [2, 11], spanning 1980–2019. In addition, water quality data for 2003–2019, including water temperature (T_w), pH, total suspended solids (TSS), dissolved organic carbon (DOC), and isotopic compositions ($\Delta^{14}C$, $\delta^{13}C$, and $\delta^{18}O$), were retrieved from the ArcticGRO Water Quality Dataset [3].

Focusing on basins minimally affected by direct human regulation (Lena, Kolyma, Yukon, and Mackenzie), we show that groundwater-dominated winter discharge increased by 43 %, 72 %, 16 %, and 16 % (Table), respectively, during 1980–2019—representing 1.7 to 5.2 times the rate of annual discharge increase [5]. Winter streamflow increases were strongest in early winter, followed by mid- and late winter. Late-winter discharge exhibited particularly high sensitivity to both mean annual and mean winter air temperatures, indicating that permafrost degradation is a primary driver of enhanced groundwater contributions. Differences in winter discharge trends among basins closely track spatial variations in permafrost extent and thaw intensity. Under warming climate conditions, winter streamflow generation is strongly associated with the enhanced hydrological cycle that is apparent in both the surface (e.g., precipitation regime and river ice) and the subsurface (the active layer and groundwater discharge).

Hydro–chemical characteristics of the six major Arctic rivers since 2003

	Ob	Yenisei	Lena	Kolyma	Yukon	Mackenzie
Q, mm/yr	169	243	248	212	254	167
Q _w /Q, %	20.9	23.4	10.1	6.2	15.8	22.3
TDS, mg/L	134.1 ± 58.9	110.6 ± 43.2	154.4 ± 76.7	80.8 ± 22.6	195.4 ± 56.0	223.4 ± 30.4
DOC, mg/L	9.5 ± 2.7	6.1 ± 3.0	9.4 ± 4.6	5.5 ± 3.1	5.8 ± 3.4	4.6 ± 1.1
POC, mg/L	1.3 ± 0.5	0.4 ± 0.2	0.7 ± 0.8	0.7 ± 0.7	2.3 ± 1.9	1.3 ± 1.2
Permafrost coverage, %	39	66	95	100	97	77

Note: Data are expressed as the mean ± one standard deviation based on daily ArcticGRO water sampling data [4]. POC data cover the period 2003–2021, whereas all other variables are based on records from 2003–2019. Q and Q_w denote annual and winter streamflow, respectively, and permafrost coverages were sourced from Obu et al. (2019) [9].

Concurrently, intensified groundwater discharge under permafrost thaw has driven pronounced changes in river mineralization and solute export. During 2003–2019, annual total dissolved solids (TDS) fluxes increased significantly in the Ob, Kolyma, and Yukon rivers at rates of 4.38, 1.62, and 3.03 Tg per decade, respectively, reflecting enhanced groundwater–surface water exchange under warming conditions [6]. Isotopic evidence further indicates that winter riverine dissolved and particulate organic carbon (DOC and POC) exhibits the oldest radiocarbon ages ($\Delta^{14}\text{C}$ –DOC up to ~1650 years BP) during the freezing period (November–April), when streamflow is predominantly groundwater–derived [7]. Rivers with lower permafrost coverage (e.g., Ob and Yenisei) show higher winter POC contributions (10–20 %) compared to basins with continuous permafrost (<5 %), highlighting the role of permafrost degradation in winter carbon export [8].

These results demonstrate that changes in groundwater quantity and quality—including winter baseflow, TDS, and carbon isotopic signatures—provide strong evidence for subsurface hydrological reorganization under climate warming [10]. Continued warming is expected to further enhance solute export and mobilization of aged carbon via groundwater pathways, with important implications for Arctic river ecosystems and downstream water quality.

References

1. Feng D., Gleason C.J., Lin P., Yang X., Pan M. & Ishitsuka Y. Recent changes to Arctic river discharge // *Nature Communications*, 2021. 12(1): 6917.
2. Holmes R.M. Climate change impacts on the hydrology and biogeochemistry of arctic rivers // In: Goldman, C.R., Kumagai, M., Robarts, R.D. (Eds.), *Climatic Change and Global Warming of Inland Waters*, 2013. pp.1–26.
3. Holmes R.M., McClelland J.W., Tank S.E., Spencer R.G.M., Shiklomanov A.I. Arctic Great Rivers Observatory // *Water Quality Dataset*, Version 20210717, 2021.
4. Holmes R. M., McClelland J.W., Tank S.E., Spencer R.G.M., Shiklomanov A.I. Arctic Great Rivers Observatory // *Water Quality Dataset*, Version 20220609, 2021.
5. Liu S., Wang P. *, Yu J., Wang T., Cai H., Huang Q., Pozdniakov S.P., Zhang Y., Kazak E. Mechanisms behind the uneven increases in early, mid– and late winter streamflow across four Arctic river basins // *Journal of Hydrology*, 2022. 606: 127425.
6. Liu S. and P. Wang. Emerging solute–induced mineralization in Arctic rivers under climate warming // *Science of the Total Environment*, 2022. 851: 158091.
7. Liu S., Wang P. *, Pozdniakov S.P., Kazak E.S. Seasonality of riverine DOC exports in permafrost–dominated Arctic river basins under a warming climate // *Journal of Hydrology*, 2022. 612: 128060.
8. Liu S., Wang P. *, Yu J., Zhou R., Bai B., Gabysheva O.I., Frolova N.L., Pozdniakov S.P. Changes in hydrological regime regulate POC export across permafrost–dominated Arctic River basins // *Geoscience Frontiers*, 2026. 17 (2026) 102208.
9. Obu J., Westermann S., Käab A., Bartsch A. Ground Temperature Map, 2000–2016, Northern Hemisphere Permafrost // *PANGAEA*, 2019.
10. Richardson C.M., Peucker–Ehrenbrink B., Wyatt S. Effects of climate change on river and groundwater nutrient inputs to the coastal ocean // *Commun Earth Environ*, 2025. 6, 761.
11. Shiklomanov A.I., Holmes R.M., McClelland J.W., Tank S.E., Spencer R.G.M. Arctic Great Rivers Observatory // *Discharge Dataset*, Version 20210205, 2021.

INCREASING ROLE OF GROUNDWATER IN COLD-REGION HYDROLOGICAL PROCESSES UNDER A WARMING CLIMATE

Wang Ping¹, Liu Shiqi¹, Yu Jingjie¹, Pozdniakov S.P.²

¹*Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research,
Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, wangping@igsnrr.ac.cn*

²*Lomonosov Moscow State University, Department of Hydrogeology, Moscow*

Аннотация. Подземные воды являются ключевым и устойчивым компонентом экологической и антропогенной водной безопасности в условиях ускоряющейся климатической изменчивости. Однако их конкретная функциональная роль в гидрологии холодных регионов остается недостаточно изученной. Настоящее исследование синтезирует недавние достижения в характеристике стока подземных вод в поток и выявляет факторы наблюдаемых гидрологических сдвигов. Увеличение зимнего базисного стока и минерализации стока рек служит убедительным доказательством интенсификации подповерхностного потока. Эти изменения фундаментально обусловлены деградацией криосферы, в частности утолщением активного слоя, расширением таликов и усилением гидравлической связности, что в совокупности увеличивает сток в речные сети. Несмотря на эти выводы, нелинейные взаимодействия между вечномерзлыми грунтами, растительностью и гидро-климатическими факторами продолжают создавать трудности для моделирования и прогнозирования систем. Подчеркивается необходимость интегрированных многоуровневых подходов для преодоления текущих пробелов в гидрогеологии холодных регионов.

Ключевые слова: подземные воды, изменение климата, гидрология холодных регионов, деградация вечной мерзлоты

Abstract. Groundwater is a pivotal and resilient component of ecological and anthropogenic water security under accelerating climate variability. However, its specific functional role in cold-region hydrology remains insufficiently constrained. This study synthesizes recent advancements in characterizing groundwater-to-streamflow discharge in permafrost-affected catchments and identifies the drivers of observed hydrological shifts. Increasing winter baseflow and streamflow mineralization provide robust evidence of intensifying subsurface flow. These changes are fundamentally driven by cryospheric degradation, specifically active layer thickening, talik expansion, and enhanced hydraulic connectivity, which collectively augment discharge to fluvial networks. Despite these insights, non-linear interactions between permafrost, vegetation, and hydro-climatic forcing continue to challenge system modeling and projection. Emphasized the need for integrated, multi-scale frameworks to bridge current gaps in cold-region hydrogeology.

Keywords: groundwater, climate change, cold-region hydrology, permafrost degradation

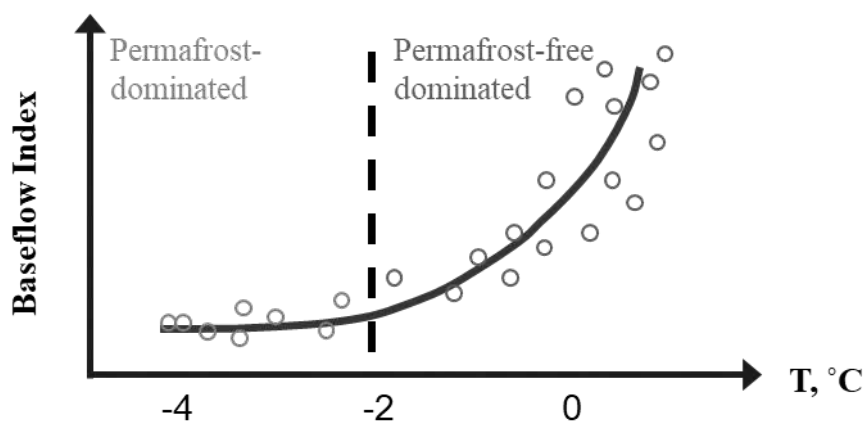
Groundwater is a fundamental component of cold-region hydrology, sustaining baseflow, feeding aufeis fields, and regulating runoff [1]. Groundwater systems are typically classified into three hydrogeological domains based on their spatial relationship with permafrost: suprapermafrost, intrapermafrost, and subpermafrost groundwater [2]. Suprapermafrost groundwater is found in the active layer, the seasonally thawed zone of soil above the permanently frozen ground (permafrost). This type of groundwater is mainly replenished by rainfall, surface water, and lateral flow within the active layer. Intrapermafrost groundwater consists of unfrozen water within the permafrost layer, contained in unfrozen zones known as taliks. Unlike the seasonally thawed active layer above, intrapermafrost groundwater remains unfrozen year-round. Subpermafrost groundwater is a confined water source that flows in aquifers beneath a layer of frozen ground or permafrost. Deep subpermafrost groundwater aquifers are difficult to access and are only used for human water consumption to a limited degree.

Emerging evidence indicates that the spatial extent and hydraulic significance of these three groundwater domains are undergoing a fundamental reorganization driven by climate warming. Notably, suprapermafrost and intrapermafrost storage capacities are expanding across various high-latitude and high-altitude catchments [3]. The distribution and accessibility of these resources remain highly heterogeneous, dictated by regional geomorphology and localized thaw conditions. Furthermore, the presence of permafrost governs landscape-scale flow paths, significantly modulating stream discharge and thermal regimes [4]. The source of groundwater, whether from suprapermafrost taliks or deeper regional aquifers, will influence water availability as the permafrost continues to warm and thaw [1].

Climate warming has significantly increased Arctic surface runoff, though this trend exhibits substantial spatial and seasonal heterogeneity [5]. A defining characteristic of this hydrological shift is the disproportionate intensification of winter discharge. In these high-latitude regions, winter typically spans from November to April, a period during which precipitation is sequestered as snow and surface runoff is negligible. Consequently, winter streamflow is predominantly sustained by groundwater-derived baseflow [6]. In major North American systems such as the Mackenzie and Yukon rivers, winter discharge historically accounts for only 21% and 15% of annual flow, respectively, yet recent data reveal a marked acceleration in these volumes [7]. Long-term monitoring indicates a pervasive upward trend in winter flow across the pan-Arctic. Between 1980 and 2009, the aggregate winter discharge (December–February) of the four largest Arctic rivers—the Ob, Yenisei, Lena, and Mackenzie—rose by 1.3% [8]. More recent assessments (1980–2019) show even more dramatic increases, with winter discharge in the Lena and Kolyma rivers rose by 43%, 72%, 16%, and 16%, respectively, representing 1.7 to 5.2 times the rate of their annual discharge increases [8].

Additionally, when compared to the period from 1936 to 1975, winter streamflow in the Northern Dvina, Pechora, and Ob rivers, as well as in the rivers of northern West Siberia and the western Laptev Sea basin, increased by 15–40% during 1976–2015 [9]. During the same period, the Yenisei, Lena, and Kolyma rivers experienced even more significant increases, with winter discharge rising by 68%, 47%, and 174%, respectively [9]. Notably, changes in winter runoff tend to be more pronounced in smaller basins compared to larger ones. For instance, in the upper Yenisei Basin, winter discharge surged by 80% over the past 25 years (1995–2019), while annual runoff during the same period increased by only 7% [10]. Employing the space-for-time substitution approach, a 1 °C warming is projected to lead to an approximately 11% increase in winter streamflow, equating to an increase of 1.4–2.4 mm per decade across the four Arctic basins [8].

The observed increases in winter baseflow and streamflow mineralization due to climate warming (Figure) offer direct evidence of enhanced groundwater discharge. These trends highlight the crucial role of subsurface processes in maintaining river flow, especially during winter low-flow periods when surface runoff is minimal. Furthermore, the rising mineralization of streamflow suggests longer groundwater residence times and improved subsurface flowpath connectivity, indicating that cold-region hydrological systems are transitioning from surface water to groundwater dominance in a warming climate [11].



Schematic diagram illustrating the nonlinear relationship between the baseflow index and air temperature.

The mechanisms driving these changes are complex, primarily linked to permafrost degradation. Firstly, the deepening of the active layer increases the thickness of the seasonally thawed zone, enhancing vertical infiltration and allowing for greater recharge of shallow aquifers. Secondly, the expansion and merging of taliks—unfrozen zones within the permafrost—create hydrologically active conduits that bypass frozen barriers, facilitating sustained groundwater–surface water

exchange. Thirdly, the development of lateral flow pathways, often influenced by topographic gradients and thawing permafrost boundaries, contributes to increased groundwater delivery to rivers. Together, these processes signify a significant reorganization of the subsurface hydrological network in cold regions, with cascading effects on streamflow seasonality, chemistry, and ecosystem function.

From the perspective of the water cycle, the ongoing and rapid warming of the climate has intensified land-atmosphere interactions in cold, high-latitude regions, resulting in increased atmospheric moisture content and driving significant rises in precipitation, evaporation, and runoff [12]. This suggests that global warming is intensifying the water cycle in cold regions. As rivers act as crucial links between land and ocean, the increase in river discharge has been accompanied by substantial rises in the fluxes of freshwater, sediments, and other terrigenous dissolved and particulate materials delivered to the Arctic Ocean. These inputs alter the temperature, salinity, sea ice conditions, and even the circulation of the Arctic Ocean, thereby enhancing ocean-atmosphere energy exchange and contributing to Arctic amplification through positive feedback processes.

In basins dominated by continuous permafrost, warming enhances hydrological connectivity [13] and soil water storage capacity, as extensive permafrost acts as an aquiclude, limiting surface-subsurface exchanges. Conversely, regions with less permafrost development are shifting from snowmelt-dominated hydrological regimes to increased rainfall and runoff contributions [14]. As permafrost thaws (e.g., Lena Basin), increased precipitation under a warmer climate regime becomes the primary contributor to annual streamflow changes [15], with additional influence from enhanced subsurface water storage and connectivity.

In many cold-region catchments, groundwater contributions to streamflow are on the rise, diminishing the predominance of nival runoff. This shift stabilizes river discharge and prolongs flow during dry spells or when ice covers the surface. However, in certain areas, the initial increase in discharge due to declining permafrost may eventually lead to a long-term depletion of groundwater reserves. Cold-region hydrology is shaped by highly nonlinear interactions among climate forcing, vegetation dynamics, soil thermal regimes, and permafrost degradation. These complex interactions pose significant challenges in observing, modeling, and predicting future groundwater-surface water interactions. The scarcity of long-term field measurements and the logistical challenges of monitoring remote permafrost landscapes hinder our ability to accurately capture groundwater dynamics at meaningful spatial and temporal scales. Additionally, most hydrological models are still limited in their capacity to represent coupled cryosphere-groundwater processes, such as the feedbacks between talik development, subsurface flow, and thermal dynamics. Incorporating permafrost-groundwater interactions into next-generation hydrological and Earth system models is crucial for reducing uncertainties in projections of cold region hydrology.

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. W2412055, 42471036) and Russian Science Foundation (25-47-00056).

Reference

1. Koch, J.C., et al., The dominance and growth of shallow groundwater resources in continuous permafrost environments. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2024. 121(23): p. e2317873121.
2. Williams, J.R., Ground Water in the Permafrost Regions of Alaska, in *Geological survey professional paper*. 1970.
3. van Tiel, M., et al., Cryosphere-groundwater connectivity is a missing link in the mountain water cycle. *Nature Water*, 2024. 2(7): p. 624–637.
4. Sjöberg, Y., et al., Permafrost Promotes Shallow Groundwater Flow and Warmer Headwater Streams. *Water Resources Research*, 2021. 57(2): p. e2020WR027463.
5. Yang, D. and D.L. Kane, *Arctic hydrology, permafrost and ecosystems*. 2020: Springer Nature.
6. St. Jacques, J.-M. and D.J. Sauchyn, Increasing winter baseflow and mean annual streamflow from possible permafrost thawing in the Northwest Territories, Canada. *Geophysical Research Letters*, 2009. 36(1).
7. Ahmed, R., et al. Recent Trends in Freshwater Influx to the Arctic Ocean from Four Major Arctic-Draining Rivers. *Water*, 2020. 12, DOI: 10.3390/w12041189.
8. Liu, S., et al., Mechanisms behind the uneven increases in early, mid- and late winter streamflow across four Arctic river basins. *Journal of Hydrology*, 2022. 606: p. 127425.

9. Magritsky, D.V., et al., Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector. *Polarforschung*, 2018. 87(2): p. 177–194.
10. Panyushkina, I.P., et al., Unprecedented acceleration of winter discharge of Upper Yenisei River inferred from tree rings. *Environmental Research Letters*, 2021. 16(12): p. 125014.
11. Wang, P., et al., Climate warming enhances chemical weathering in permafrost-dominated eastern Siberia. *Science of The Total Environment*, 2024. 906: p. 167367.
12. Zhang, X., et al., Enhanced poleward moisture transport and amplified northern high-latitude wetting trend. *Nature Climate Change*, 2013. 3(1): p. 47–51.
13. Pierrick, L.-H., et al., Changing groundwater discharge dynamics in permafrost regions. 2018. 13.
14. Lafrenière, M.J. and S.F. Lamoureux, Effects of changing permafrost conditions on hydrological processes and fluvial fluxes. *Earth-Science Reviews*, 2019. 191: p. 212–223.
- Wang, P., et al., Potential role of permafrost thaw on increasing Siberian river discharge. *Environmental Research Letters*, 2021. 16(3): p. 034046.

PERMAFROST STATE DETERMINES THE NON-UNIFORM RESPONSE OF RIVER RUNOFF TO CLIMATE WARMING

Wang Tianye¹, Wang Ninghao¹, Wang Ping²

¹*School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, China,
wangtianye@zzu.edu.cn*

²*Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China*

Аннотация. На фоне быстрого потепления гидрологический режим рек в высокоширотных районах вечной мерзлоты претерпевает значительные изменения. Однако пространственно-временная неоднородность изменений стока и механизмы их регулирования остаются неясными. В данном исследовании в качестве исследуемой территории выбран бассейн р. Лены с репрезентативными станциями мониторинга в ее верхнем, среднем и нижнем течении. На основе многолетних данных ежедневных наблюдений за расходом воды с каждой станции были использованы различные статистические методы для анализа изменяющихся характеристик стока, включая тренды, циклы и экстремальные значения, а также для выявления (не)стационарных закономерностей эволюции стока и влияющих на них механизмов. Результаты показывают значительную пространственную изменчивость в изменениях стока реки. В верхнем течении наблюдается заметная тенденция к снижению стока; в среднем течении сохраняется относительная стабильность, в то время как в нижнем течении сток значительно увеличивается, при этом темпы роста зимнего стока заметно выше, чем летнего. Кроме того, время наступления ежегодного пика максимального паводка постепенно сдвигается, что означает, что по мере увеличения степени покрытия вечной мерзлотой масштабы увеличения стока становятся более выраженными. Это говорит о том, что степень развития вечной мерзлоты влияет на чувствительность стока к изменению климата. В верхнем течении глобальное потепление и деградация прерывистой вечной мерзлоты приводят к усилению испарения и просачивания, способствуя вертикальной потере воды. В нижнем течении деградация сплошной вечной мерзлоты облегчает обмен между поверхностными и подземными водами, что приводит к увеличению подземного стока в больших масштабах.

Ключевые слова: *речной сток, глобальное потепление, деградация вечной мерзлоты, подземные воды*

Abstract. Against the backdrop of rapid warming, the hydrological regime of rivers in high-latitude permafrost regions is undergoing significant changes. However, the spatiotemporal heterogeneity of runoff changes and their regulatory mechanisms remain unclear. This study takes the Lena River Basin as the research area, selecting representative monitoring stations in its upper, middle, and lower reaches. Based on long-term daily flow observation data from each station, various statistical methods are employed to analyze the changing characteristics of flow, including trends, cycles, and extreme values, and to identify the (non-)stationary evolution patterns of flow and their influencing mechanisms. The results indicate that there is significant spatial variability in the flow changes of the river. The upstream flow exhibits a notable declining trend; the middle reaches maintain relative stability, while the downstream flow significantly increases, with the growth rate of winter flow markedly faster than that of summer flow. Additionally, the timing of the annual maximum flood peak is gradually advancing, meaning that as the permafrost coverage rate increases, the extent of runoff increase becomes more pronounced. This suggests that the development degree of permafrost influences the sensitivity of runoff to climate change. In the upstream, climate warming and the degradation of discontinuous permafrost lead to enhanced evaporation and seepage, promoting vertical water loss. In the downstream, the degradation of continuous permafrost facilitates the exchange between surface water and groundwater, resulting in an increase in groundwater runoff on a large scale.

Keywords: *streamflow, climate warming, permafrost degradation, groundwater*

Against the backdrop of rapid global climate warming, the hydrological regimes of rivers in cold regions are undergoing significant and profound systemic transformations. Among these changes, permafrost degradation is considered one of the critical factors affecting hydrological processes in high-latitude basins [1]. The vertical soil profile in permafrost regions is typically divided, from top to bottom, into the active layer, the permafrost layer, and the unfrozen layer. With climate warming, permafrost degradation primarily manifests as rising temperatures and thinning of the permafrost layer [2]. This degradation can occur at the permafrost table, the permafrost base (bottom), or both simultaneously. Because the degree of soil freezing directly determines soil moisture content and hydraulic conductivity, permafrost degradation impacts the formation and spatiotemporal distribution patterns of runoff by altering soil infiltration capacity, groundwater baseflow recharge, and basin routing processes [3].

The Lena River Basin, one of the three largest rivers in the pan-Arctic region, serves as a typical area for studying permafrost-hydrology interactions. Permafrost is widely distributed across the basin, with permafrost types exceeding 50% continuity (including continuous and discontinuous permafrost) accounting for 82% of the total basin area, exhibiting significant spatial differentiation characteristics [4]. During the period from 1936 to 2019, although the overall temperature of the basin continued to rise, the trends in runoff changes across different river reaches showed marked differences [5]. Previous studies suggest that the spatial disparities in permafrost distribution patterns and their varying degrees of degradation are important drivers of this inconsistent runoff response.

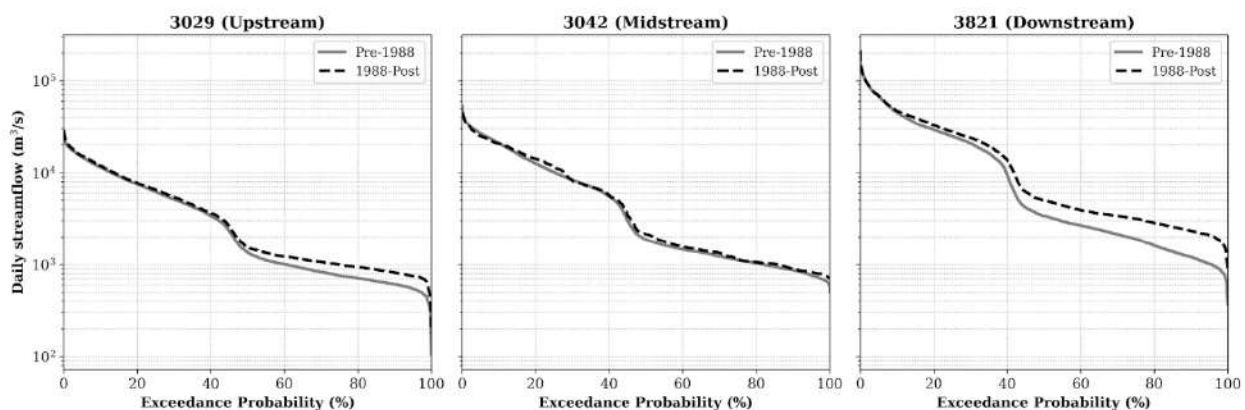
Spatiotemporal Heterogeneity Characteristics of Runoff Evolution. In examining hydrological changes in cold regions, runoff serves as an integrated indicator of basin-scale response and exhibits pronounced spatiotemporal heterogeneity. Using long-term daily discharge records from the upstream (3029), midstream (3042), and downstream (3821) stations of the Lena River Basin, combined with the Pettitt change-point test and sequential Mann–Kendall analysis, significant nonstationarity and a key transition year were identified.

The results reveal strong spatial divergence. A significant regime shift occurred in the downstream reach in 1988 ($p < 0.01$), whereas the midstream reach remained statistically stable ($p > 0.5$), and the upstream reach exhibited a gradual decline without abrupt change. Thus, 1988 marks a critical boundary between the pre- and post-warming hydrological phases.

Table. Long-term trends in annual extreme discharges and peak timing across the Lena River Basin.
(Note: Timing is measured in Day of Year, DOY.)

Station (Location)	Data Period	Max Discharge (m ³ /s/yr)	Max Timing (days/yr)	Min Discharge (m ³ /s/yr)	Min Timing (days/yr)
3029 (Upstream)	1952-1999	+58.75	+0.30	-0.82	+2.89
3042 (Midstream)	1950-1992	-90.29	+0.41	+0.10	+0.49
3821 (Downstream)	1936-2022	+16.41	-1.28	+21.06	+0.93

Flow duration curves and extreme discharge series further highlight contrasting seasonal responses (Figure). Downstream, annual runoff and winter low flows increased markedly, resulting in a more even intra-annual distribution. In contrast, the midstream regime remained stable, while both high and low flows declined upstream. Additionally, the timing of the annual maximum flood peak advanced significantly across the basin.



Comparison of flow duration curves (FDCs) at the upstream (3029), midstream (3042), and downstream (3821) stations of the Lena River Basin. The solid gray line represents the pre-1988 period, and the dashed black line represents the 1988-post period, illustrating the contrasting seasonal runoff adjustments.

Overall, runoff sensitivity shows a pronounced nonlinear association with permafrost coverage. The spatial asynchrony of hydrological shifts underscores the critical role of permafrost distribution and degradation stage in regulating basin-scale hydrological responses.

Mechanisms Regulating Non-uniform Runoff Response by Permafrost State. The pronounced spatiotemporal heterogeneity in runoff evolution across the Lena River Basin, including gradual discharge decline in the upstream, nonlinear enhancement of winter baseflow in the downstream, and a basin-wide advancement of peak flow timing, reflects fundamentally different hydrological responses to spatially heterogeneous permafrost degradation. Permafrost continuity controls the hydraulic boundary conditions between surface water and groundwater systems and thereby governs the direction and magnitude of hydrological adjustment under climate warming [1].

In the upstream region, where discontinuous and sporadic permafrost prevail, climatic warming accelerates active layer thickening and promotes talik formation and basal thaw. Such structural changes substantially increase vertical hydraulic conductivity, allowing surface and near-surface water to percolate into deeper aquifers. At the same time, rising air temperature enhances evapotranspiration losses. This vertically dominated redistribution of water reduces effective runoff generation and leads to progressive discharge decline, a pattern consistent with observations from other discontinuous permafrost basins [6].

In contrast, the downstream region is largely underlain by continuous permafrost. In these areas, early-stage degradation tends to deepen the active layer and expand lateral taliks rather than immediately establishing deep drainage pathways. The weakening of the permafrost barrier enhances groundwater–stream connectivity and facilitates the release of previously stored subsurface water into river channels [7]. This mechanism provides a plausible explanation for the abrupt increase in winter low flows after 1988 and for the more pronounced growth of cold-season discharge relative to summer flows [8].

In addition, rising air temperature and earlier snowmelt advance the onset of spring runoff, while earlier thaw of the active layer reduces infiltration resistance during melt periods. These processes collectively contribute to the observed basin-wide advancement of the annual maximum flood timing [9].

Taken together, the spatial contrast between vertically enhanced drainage in discontinuous permafrost zones and laterally strengthened groundwater connectivity in continuous permafrost regions provides a coherent mechanistic framework for interpreting the divergent runoff responses across the basin. Permafrost continuity and degradation stage therefore regulate not only the magnitude but also the seasonal structure of hydrological change under Arctic warming.

Conclusive remarks. Global warming is profoundly reshaping the hydrological cycle in the Arctic region. As a representative basin for cold-region hydrological changes, the Lena River Basin exhibits significant spatiotemporal differentiation in the response of runoff to permafrost states. The non-uniform evolution resulting from this spatiotemporal differentiation not only reshapes the spatial pattern of water resources within the basin but also exerts potential feedbacks on the Arctic and global climate systems. The increase in downstream runoff, particularly during winter, significantly elevates the freshwater flux into the ocean, which may alter the surface salinity structure of the Arctic Ocean and trigger cascading effects on the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) and the global climate [10, 11]. Meanwhile, against the backdrop of enhanced poleward moisture transport and a wetting trend at high latitudes [12], the non-linear coupling between permafrost degradation and water cycle intensification will be further exacerbated.

Looking forward, given the strong non-linear feedbacks among permafrost degradation, vegetation succession, and hydro-climatic forcing, existing models still struggle to accurately characterize cross-strata moisture migration and surface-groundwater interactions under varying permafrost conditions. There is an urgent need to construct an integrated modeling framework that couples multiple scales and processes, precisely incorporating the dynamic degradation of permafrost and its spatial heterogeneity into basin-scale and even Earth system models. This is imperative for reducing uncertainties in cold-region water cycle projections and supporting decision-making for pan-Arctic water resource management and climate change adaptation.

References

1. Ahmed, R., Prowse, T., Dibike, Y., Bonsal, B. & O'Neil, H. Recent Trends in Freshwater Influx to the Arctic Ocean from Four Major Arctic-Draining Rivers. *Water* 12, 1189 (2020).
2. Bense, V. F., Kooi, H., Ferguson, G. & Read, T. Permafrost degradation as a control on hydrogeological regime shifts in a warming climate. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 117 (2012). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2011JF002143>
3. Biskaborn, B. K. et al. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications* 10, 264 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>
4. Lamontagne-Hallé, P., McKenzie, J. M., Kurylyk, B. L. & Zipper, S. C. Changing groundwater discharge dynamics in permafrost regions. *Environmental Research Letters* 13, 084017 (2018). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad404>
5. Obu, J. et al. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. *Earth-Science Reviews* 193, 299–316 (2019). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023>
6. Peterson, B. J. et al. Increasing River Discharge to the Arctic Ocean. *Science* 298, 2171–2173 (2002). <https://doi.org/doi:10.1126/science.1077445>
7. Smith, L. C., Sheng, Y., MacDonald, G. M. & Hinzman, L. D. Disappearing Arctic Lakes. *Science* 308, 1429–1429 (2005). <https://doi.org/doi:10.1126/science.1108142>
8. Walvoord, M. A. & Kurylyk, B. L. Hydrologic Impacts of Thawing Permafrost—A Review. *Vadose Zone Journal* 15, vzj2016.2001.0010 (2016). <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/vzj2016.01.0010>
9. Wang, P. et al. Potential role of permafrost thaw on increasing Siberian river discharge. *Environmental Research Letters* 16, 034046 (2021). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe326>
10. Yang, D. et al. Siberian Lena River hydrologic regime and recent change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 107, ACL 14-11–ACL 14-10 (2002). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2002JD002542>
11. Zhang, X. et al. Enhanced poleward moisture transport and amplified northern high-latitude wetting trend. *Nature Climate Change* 3, 47–51 (2013). <https://doi.org/10.1038/nclimate1631>
12. Tan, A., Adam, J. C. & Lettenmaier, D. P. Change in spring snowmelt timing in Eurasian Arctic rivers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116 (2011). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2010JD014337>.

V. ПОДЗЕМНАЯ ГИДРОСФЕРА В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕНЕЗА

К ВОПРОСУ О ПРИРОДЕ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО МЕГАБАССЕЙНА

Абдрашитова Р.Н., Сальникова Ю.И., Ковяткина Л.А., Семенова Т.В.
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, abdrashitovarn@tyuiu.ru

Аннотация. Исследование посвящено вопросам трансформации гидрогеохимических условий нефтяных месторождений центральной части Западно-Сибирского мегабассейна под воздействием техногенеза. Проанализированы данные мониторинга подземных вод апт-альб-сеноманского гидрогеологического комплекса Западно-Усть-Балыкского и Тайлаковского месторождений на двух этапах: «до» и «после» начала функционирования системы поддержания пластового давления (ППД). Комплекс используется как для добычи подземных вод для ППД, так и в качестве поглощающего горизонта для размещения излишков попутных вод. Установлено, что средние значения минерализации подземных вод в целом остаются в пределах характерных показателей для природного гидрогеохимического фона, но при этом наблюдаются периодические аномалии химического состава с невыясненным генезисом. Интенсивность их появления определяется активностью процессов отбора и утилизации вод в исследуемый комплекс.

Ключевые слова: *Западно-Сибирский мегабассейн, поддержание пластового давления, гидрогеохимия глубоких горизонтов, нефтегазовая гидрогеология*

Abstract. The study is devoted to the transformation of hydrogeochemical conditions of oil fields in the central part of the West Siberian megabasin under the influence of technogenesis. The data of groundwater monitoring of the Apt-Albian-Cenomanian hydrogeological complex of the Zapadno-Ust-Balykskoye and Tailakovskoye fields are analyzed at two stages: "before" and "after" the start of operation of the reservoir pressure maintenance system (PPD). The complex is used both for the extraction of groundwater for PPD, and as an absorbing horizon for the disposal of excess associated waters. It has been established that the average values of groundwater mineralization generally remain within the characteristic indicators for the natural hydrogeochemical background, but at the same time, there are periodic anomalies of the chemical composition with an unclear genesis. The intensity of their occurrence is determined by the activity of the processes of water selection and utilization in the studied complex.

Keywords: *West Siberian megabasin, reservoir pressure maintenance, deep-well hydrochemistry, oil and gas hydrogeology*

Нефтегазовый техногенез в Западно-Сибирском мегабассейне (ЗСМБ) проявляется по отношению как к региональным, так и к локальным объектам. К локальным можно отнести изменение характера и скорости течения процессов взаимодействия в системе вода – порода.

Критерии аномалий гидрогеохимического состава подземных вод продуктивных и поглощающих горизонтов как индикаторов степени и характера воздействия нефтегазового техногенеза на подземную гидросферу рассмотрены в работах Л.А. Абуковой, А.М. Никанорова, В.В. Муляка, Ю.П. Гаттенбергера, В.М. Матусевича и других авторов [1, 2, 4, 6, 7]. Вопрос разработки корректных критериев гидрогеохимических аномалий состава пластовых вод является актуальным в связи с продолжающейся активной трансформацией геологической среды, ростом количества месторождений углеводородов с длительной историей разработки и сложности разрабатываемых запасов.

Изучаемая территория приурочена к центральной части Западно-Сибирской геосинеклизы, геологическое строение которой представлено складчатым фундаментом и осадочным чехлом [3, 5]. Фундамент сложен метаморфизованными и сильно дислоцированными породами докембрийского и палеозойского возраста. На отложениях фундамента с резким угловым и стратиграфическим несогласием залегают терригенные породы осадочного чехла, мощность которых достигает 3–4 и более километров. Неокомские и верхняя часть юрских отложений являются нефтеносными (мощность около 800 м).

По условиям залегания, формирования подземных вод, палеогидрогеологии и геодинамической эволюции в разрезе ЗСМБ выделены три сложных наложенных друг на друга резервуара: 1) палеозойский гидрогеологический бассейн; 2) мезозойский; 3) кайнозойский [5], соответствующие семи гидрогеологическим комплексам: олигоцен-

четвертичному, турон-палеогеновому, апт-альб-сеноманскому, неокомскому, верхнеюрскому, средненижнеюрскому и триас-алеозойскому.

Исследуемый апт-альб-сеноманский гидрогеологический комплекс (ААС ГК) относится к мезозойскому бассейну. Воды комплекса высоконапорные, избыточное давление на их устье составляет 1–7 атм. Дебиты скважин в среднем составляют 100–800 м³/сут (до 2–3 тыс.м³/сут). Песчаники характеризуются высокой пористостью – от 12 до 42 % и проницаемостью – до 12000 мД. В краевых частях бассейна состав газов азотно-метановый и метаново-азотный, при газонасыщенности от 0.4–0.5 л/л до 3 л/л. Воды комплекса широко используются для ППД эксплуатируемых нефтеносных пластов.

В рамках выполненных исследований были проанализированы геологическое строение, гидрогеологические условия и изменения гидрогеохимической обстановки ААС ГК Западно-Усть-Балыкского и Тайлаковского нефтяных месторождений центральной части ЗСМБ. Месторождения сходны по природным геологическим условиям. По рассматриваемым месторождениям проанализированы данные мониторинга за периоды наблюдений с 2011 по 2024 г. (Западно-Усть-Балыкское месторождение) и с 2006 по 2023 г. (Тайлаковское месторождение). Следует отметить, что динамика добычи вод и динамика размещения на Западно-Усть-Балыкском месторождении более интенсивная, чем на Тайлаковском.

В таблице представлены аналитические данные, характеризующие состав вод до начала их добычи из ААС ГК для заводнения нефтяных пластов. Количество данных по гидрогеохимии подземных вод на начальных этапах разработки нефтяных месторождений достаточно скудное, однако в первом приближении дает возможность получить ретроспективное представление о природном составе подземных вод.

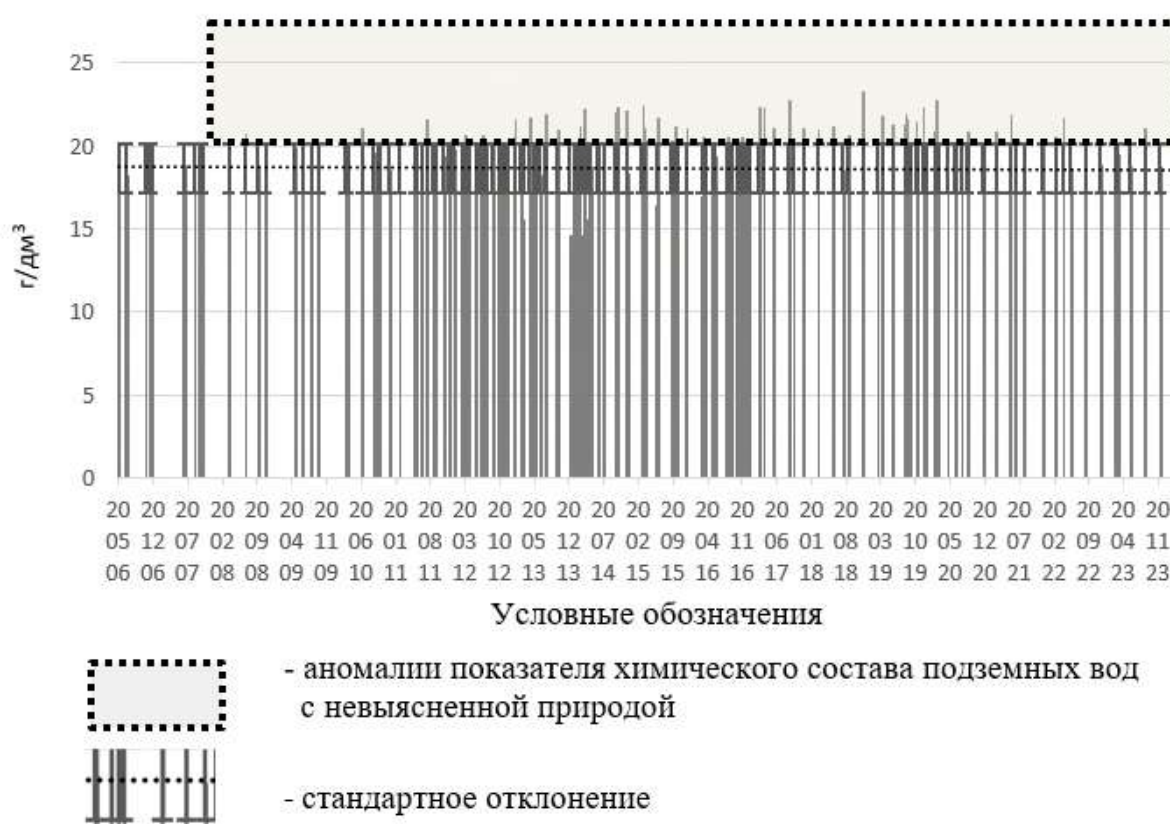
Гидрогеохимические показатели пластовых вод ААС ВК до начала применения системы ППД на нефтяных месторождениях

Наименование параметра		Западно-Усть-Балыкское месторождение	Тайлаковское месторождение
		(1963–1967 гг.)	(1969–2005 гг.)
Анионы, мг/дм ³	HCO ₃ ⁻	85.4–378.2	170.8–314.7
	Cl ⁻	9511.8–12566.7	9645.0–11562.2
	CO ₃ ²⁻	н/обн	н/обн
	SO ₄ ²⁻	н/обн–4.0	н/обн–16.5
	Br ⁻	43.3–50.6	43.9–53.8
	I ⁻	15.7–19.5	11.0–16.1
Катионы, мг/дм ³	Na ⁺ +K ⁺	5771.4–7527.9	5528.0–7106.7
	Ca ²⁺	337.5–454.1	399.0–724.5
	Mg ²⁺	56.9–145.9	77.0–128.0
	Железо	0.8–1.5	7.8–11.3
Минерализация, г/дм ³		16.1–20.8	16.1–19.6
Водородный показатель, pH		7.5–8.4	7.0–7.3
Тип вод (по В.А. Сулину)		Хлоридно-кальциевый	Хлоридно-кальциевый
Коэффициент метаморфизации rNa/rCl		0.90–0.95	0.87–0.94

Оба месторождения характеризуются наличием системы ППД и участков утилизации излишков подтоварных вод в ААС ГК. Накопленный объем добычи из ААС ГК к 2023 г. на Западно-Усть-Балыкском месторождении составил 14709.0 тыс. м³, а размещения излишков

попутных вод 10715.1 тыс. м³, для Тайлаковского месторождения соответствующие значения равны 55189.4 и 4516.7 тыс. м³.

Минерализация ААС ГК до начала разработки залежей с применением системы ППД на Западно-Усть-Балыкском месторождении составляла 16.1–20.8 г/дм³, на Тайлаковском – 16.1–19.6 г/дм³. С начала применения системы ППД средняя минерализация составила 14.1–21.8 г/дм³ и 14.1–22.8 г/дм³ соответственно. Таким образом, средние значения минерализации подземных вод ААС ГК в сравнении со значениями до применения системы ППД остаются в пределах, характерных для природного гидрогеохимического фона. Вероятно, это связано со схожестью составов пластовых и закачиваемых вод. Но при этом на месторождениях наблюдаются периодические аномалии химического состава с невыясненным генезисом. На Западно-Усть-Балыкском месторождении, где воздействие процессов добычи и утилизации более интенсивное, проявляется область с большим количеством отбракованных данных и более резкими скачками параметра минерализации, которые практически не встречаются на Тайлаковском месторождении (рисунок).



Изменение параметра минерализации ААС ГК Тайлаковского месторождения.

Предположительно, это связано с тем, что гидрогеохимическое поле при длительном и размеренном техногенном воздействии «адаптируется» к нему, что, например, и происходит на Тайлаковском месторождении. При интенсивном воздействии равновесие в системе вода – порода периодически активно нарушается. Вероятно, часть проб, которые стандартно подлежат отбраковке, являются маркерами данного техногенного процесса.

ЗСМБ – уникальный по геологическому строению и гидрогеологическим условиям объект. Объем осадочного чехла только юрско-мелового возраста составляет 11.5–12.0 млн км³ [8] что, соответственно, дополнительно обеспечивает медленность процессов и в настоящее время способствует сохранению относительного природного баланса недр.

Список литературы

1. Абукова Л.А., Абрамова О.П., Кошелев А.В., Ли Г.С. Гидрохимический контроль за разработкой месторождений углеводородов в условиях низкоминерализованных пластовых вод // Вестник ЦКР Роснедра, 2013. № 5. С. 2–7.
2. Гаттенбергер Ю.П., Дьяконов В.П. Гидрогеологические методы исследований при разведке и разработке нефтяных месторождений. М.: Недра, 1979. 207 с.
3. Конторович А.Э., Нестеров И.И., Салманов Ф.К. и др. Геология нефти и газа Западной Сибири. М.: Недра, 1975. 680 с.
4. Матусевич В.М., Ковяткина Л.А. Техногенное поле – главный фактор формирования геологической среды // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2012. № 3(93). С. 6–13.
5. Матусевич В.М., Рыльков А.В., Ушатинский И.Н. Геофлюидальные системы и проблемы нефтегазоносности Западно-Сибирского мегабассейна. Тюмень: ТюмГНГУ, 2005. 225 с.
6. Муляк В.В., Порошин В.Д., Гаттенбергер Ю.П., Абукова Л.А. Гидрохимические методы анализа и контроля нефтяных и газовых месторождений. М.: ГЕОС, 2007. 245 с.
7. Никаноров А.М. Методы нефтегазопромысловых гидрогеологических исследований. М.: Недра, 1977. С. 254.
8. Скоробогатов В.А. Крупнейшие, гигантские и уникальные осадочные бассейны мира и их роль в развитии газовой промышленности в XXI веке // Печатный Neftegaz.ru. 2018. № 10. С. 126–141.

НАДМЕРЗЛОТНЫЕ ВОДЫ УДОКАНСКОГО ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МАССИВА

Верхотуров А.Г.

Забайкальский государственный университет, Чита, weral0606@yandex.ru

Аннотация. В статье представлена оценка влияния современных гидрогеологических и геокриологических условий на проведение открытых горных работ на склонах, сложенных скальными трещиноватыми породами, перекрытыми маломощным чехлом крупнообломочных отложений (курумов), в пределах Удоканского месторождения меди. Надмерзлотные воды представляют актуальную проблему при проведении буровзрывных работ, что связано с повышенной обводненностью некоторых участков склонов и снижением эффективности горных работ.

Ключевые слова: склоны, надмерзлотные воды, ложбины стока, курумы

Abstract This article presents an assessment of the impact of current hydrogeological and geocryological conditions on open-pit mining on slopes composed of fractured rock overlain by a thin cover of coarse-grained sediments (kurums) within the Udokan copper deposit. Suprapermafrost waters pose a significant challenge during drilling and blasting operations. This is primarily related to ensuring the efficiency of drilling and blasting holes in waterlogged and highly fractured permafrost conditions.

Keywords slopes, suprapermafrost waters, runoff depressions, kurums

Вопросами формирования надмерзлотных вод в горных районах криолитозоны и их влияния на склоновые крупнообломочные отложения в разное время занимались многие исследователи (Гравис Г.Ф., 1969; Вельмина Н.А., 1970; Т.И. Каплина и др., 1975; Н.Н. Романовский и др., 1989; И. И. Железняк и И.Ю. Мальчикова, 1992; Банцеккина Т.В., 2009; В.В. Шепелев, 2011; Алексеев В.Р., 2021). Интенсивное освоение месторождений Забайкалья, и в частности Удоканского месторождения меди, в последнее десятилетие вновь поставило проблему изучения надмерзлотных вод для разработки эффективных мер по предотвращению подтопления ими зарядных скважин при проведении буровзрывных работ в карьере. Кроме этого, наледообразование, связанное с концентрированным поступлением надмерзлотного стока при техногенной подрезке склонов, является одной из проблем при обеспечении устойчивости бортов карьеров.

В разные годы, с 1975 г. по 2011 г., автор работал в данном районе, изучая условия формирования крупнообломочных отложений на хребте Удокан. Материалы исследований этого периода и результаты работ других ученых в этой области позволили подготовить данную статью. На Удоканском хребте, в пределах месторождения, высотные отметки составляют 1500–2100 м, многолетнемерзлые породы (ММП) имеют сплошное распространение, мощность ММП достигает 300–600 м и более, температура пород в слое годовых колебаний составляет от -8°C на сглаженных водоразделах до -3°C на склонах южной экспозиции. В стратиграфическом отношении породы рассматриваемой площади представлены осадочно-метаморфическими отложениями нижнепротерозойского возраста. В речных долинах и на участках разрывных нарушений встречаются сквозные водоносные талики. Обнаженные (до 70 %) склоны перекрыты маломощным чехлом крупнообломочных отложений, сложенных в интервале 0.2–2.0 м глыбовыми и крупнощебенистыми накоплениями, ниже размер глыб уменьшается и возрастает количество мелкощебенистого и дресвяного заполнителя. Грунты характеризуются значительной пористостью – 15–25 %, вблизи подошвы сезонно-талого слоя (СТС) поры, как правило, заполнены гольцовым льдом.

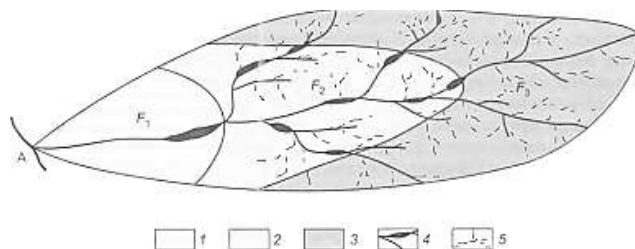
На площади Удоканского месторождения меди и по его периферии в разрезе выделяются следующие водоносные комплексы:

- рыхлых отложений в сквозных таликах,
- рыхлых отложений в слое сезонного оттаивания (надмерзлотные воды),
- трещиноватых метаморфических пород удоканской серии (подмерзлотный водоносный горизонт и водоносный горизонт коренных пород в открытых таликах).

Воды надмерзлотного водоносного комплекса в контуре карьера, где воды других комплексов в настоящее время не представляют проблем, заслуживают особого внимания. Они формируются в рыхлых склоновых отложениях СТС гольцового пояса и существуют сезонно. Питание этих вод осуществляется за счет атмосферных осадков и конденсационных вод, причем доля последних, по данным разных авторов, достигает 28.7 % от количества осадков за теплый период года [2, 7].

Для изучения причин подтопления надмерзлотными водами зарядных скважин при проведении буровзрывных работ в карьере и причин концентрирования этих вод в ложбинах стока была выполнена настоящая работа. В качестве объекта исследований были выбраны северо-восточные склоны хребта Удокан в районе с. Удокан. Методика исследований включала маршрутные наблюдения для оценки геокриологических условий территории, выявления ложбин стока; проходку шурфов на курумах, покрывающих склоны; измерение температуры по разрезу и изучение накопления снега и его трансформации в куруме. Маршрутные исследования были выполнены и в пределах месторождения.

Результаты исследований показали, что надмерзлотные воды на участках склонов, покрытых крупнообломочными отложениями или курумами, как правило, движутся по сети ложбин стока, аналогичных сети временных водотоков, дренирующих склоны, сложенные слабофильтрующими тонкодисперсными или крупнообломочными отложениями с глинистым заполнителем (рисунок). Этим и объясняется их спорадическое распространение.



Обобщенная схема высотной гидродинамической зональности надмерзлотных вод в речном бассейне (по [7] с изменениями). 1 – зона замедленного надмерзлотного стока (F_1 скорость движения надмерзлотных вод $v = 1-10$ м/сут, уклон дневной поверхности $J = 0.001-0.1$); 2 – зона интенсивного надмерзлотного стока (F_2 , $v = 10-50$ м/сут, $J = 0.01-0.1$); 3 – зона весьма интенсивного надмерзлотного стока (F_3 , $v = 10-50$ м/сут, $J > 0.1$); 4 – наледи и поверхностные воды; 5 – ложбины стока.

Реже движение надмерзлотных вод по ложбинам стока наблюдается на участках, покрытых древесной растительностью, где поверхностный сток отсутствует. Причиной формирования ложбин стока являются процессы избирательного криогенного выветривания. В первую очередь разрушаются слабые и тектонически раздробленные породы.

С увеличением высотных отметок в районе наблюдается понижение средних годовых температур воздуха от -7 °С у подножий горных сооружений до -11 °С в приводораздельных частях хребтов. В этом же направлении возрастает и количество осадков от 350 (м/с Чара, 700 м) до 767 мм/год (м/с Удокан, 1570 м) [5] и число циклов замораживания – оттаивания в сезонно-талом слое от 30–50 в нижних частях склонов до 100–200 в гольцовой зоне. Это приводит к избирательной интенсивной дезинтеграции обломочного материала в слое сезонного оттаивания ниже «бронирующего слоя». Сток надмерзлотных вод к участкам, расположенным гипсометрически ниже, приводит к появлению ложбин и выносу дисперсного материала к нагорным террасам и подножьям склонов.

Некоторое повышение средних годовых температур пород в контуре карьера вызвано:

1) наличием инверсии зимних температур формирующихся в результате застаивания холодных воздушных масс в днищах замкнутых котловин. Это приводит к тому, что на высоте 100–1400 м фиксируются меньшие суммы зимних отрицательных средних месячных температур, чем на выше или ниже расположенных участках местности;

2) повышенной мощностью снежного покрова в районе месторождения, которая составляет 49.4 см при плотности 0.239 г/см³. Расчетные температуры пород по м/с Удокан повышаются и составляют от –2.1 до +0.4 °С, что полностью определяется мощностью снежного покрова [5]. На водоразделах и участках склонов, где рельеф способствует сдуванию снега, средние годовые температуры пород приближаются к температурам воздуха, а с высотой уменьшаются еще значительно.

Названные выше факторы способствуют более длительному существованию в осенне-зимний период надмерзлотных вод на выположенных участках в склонов. В весенне-летний период отмечаются свои особенности в формировании надмерзлотных вод. С началом радиационных оттепелей снег на склонах, сложенных грубообломочными отложениями, подтаивает и начинает опускаться вниз (за вычетом величины, идущей на испарение) по направлению действия силы тяжести в поры, размер которых достигает 0.2 м, и далее к подошве слоя сезонного оттаивания. С высотой количество подтаявшего снега, поступающего в грубообломочные отложения (курумы), возрастает пропорционально мощности снежного покрова. Опускаясь между обломками, подтаявший снег перекристаллизовывается сначала в фирн, затем в натечные льды, которые активно участвуют в криогенезе ниже «бронирующего» слоя [4, 6]. Криогидратационный механизм выветривания наиболее активно действует в нижней части сезонно-талого слоя курумов и значительно слабее – в верхней, что и обеспечивает появление на поверхности, так называемого «бронирующего слоя», сложенного крупными глыбами. Установлено, что интенсивность опускания снега при радиационных оттепелях тесно связана с коэффициентом сезонного оттаивания (K_o) крупнообломочных отложений и составляет от 10.4–12.2 мм/°С для крупноглыбовых отложений до 2.0–3.5 мм/°С для крупнощебенистых. Под параметром K_o понимается глубина опускания фирна и натечного льда при возрастании температуры на поверхности грунта на 1 °С. Радиационные оттепели часто сменяются заморозками, которые иногда понижают температуру в теле курума на 10–20 °С и приводят к замерзанию талых вод в трещинах и дезинтеграции обломочного материала. Дальнейшее повышение температуры поверхности грунта приводит к таянию натечных льдов, движению образующейся воды вниз к склону в виде струек. Талые воды приносят к криогенному водоупору мелкозем, органические примеси, захваченным ими в процессе движения. Здесь на контактах с охлажденными сухими обломками вода вновь замерзает в трещинах и на поверхности мелкозема. В результате формируется сезонный гольцовый лед, который при его оттаивании из профиля СТС крупнообломочных склоновых отложений, наравне с осадками, является источником формирования надмерзлотного склонового стока. По данным исследований, репрезентативных для гольцового пояса, вклад в водный режим склонов внутригрунтовой конденсации незначителен и редко превышает 0.1 мм/сут [2, 3]. Разгрузка надмерзлотных вод приурочена обычно к подножьям склонов дебит источников колеблется от 0.1 до 0.5 л/с и зависит от выпадения атмосферных осадков и интенсивности таяния гольцовых льдов. Общая минерализация надмерзлотных вод не превышает 0.03–0.05 г/дм³. Состав преимущественно гидрокарбонатный натриевый, кальциевый. Процесс формирования гольцового льда заканчивается примерно через 20 дней после начала снеготаяния. Затем резко возрастает сток надмерзлотных вод, особенно в первой половине летнего периода при выпадении обильных осадков. Мощность слоя стекающей воды достигает 0.5–5.0 мм, составляя в среднем 0.2–1.0 мм. Из-за фильтрационной неоднородности склоновых отложений, разных темпов сезонного оттаивания плановая фильтрация нарушается и движение надмерзлотного стока осуществляется по ослабленным линейным зонам (ложбинам стока), где скорости фильтрации близки к скоростям течения в открытых руслах (рисунок). Вот почему в нижних частях курумных отложений так часто встречаются окатанные обломки горных пород [1].

Водопритоки на горизонты отработки месторождения имеют выраженный сезонный характер и избирательный характер поступления. Формирование и движение надмерзлотных вод по ложбинам стока на склонах могут значительно отличаться, что связано с различием

высотных отметок, мощности снежного покрова, наличием почвенно-растительного слоя на склонах, уклонов криогенных водоупоров СТС, гранулометрического состава отложений. Глубина положения уровня надмерзлотных вод, время их нахождения на склоне, расходы определяют в какой зоне (рисунок) находится рассматриваемый участок (зоне весьма интенсивного надмерзлотного стока – периодически появляющегося обводнения; зоне интенсивного надмерзлотного стока – периодически исчезающего обводнения или зоне замедленного надмерзлотного стока – постоянного обводнения) [7], глубину слоя сезонного оттаивания, наличие или отсутствие гольцовых льдов. На склонах крутизной менее 10°, где процесс дренирования отложений и суффозионный вынос затруднены, может происходить кольматация внутрикурумных ложбин стока и образование тупиковых ложбин. Здесь формируется высокообводненный надмерзлотный горизонт, при промерзании которого образуются валы выпирания, весьма опасные в инженерно-геологическом отношении, так как при оттаивании возможны большие осадки грунтов и деформации сооружений. Таким образом, при изучении надмерзлотных вод в склоновых отложениях гольцового пояса гор в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород надо учитывать следующие обстоятельства:

1. Надмерзлотные воды на отдельных участках склонов, покрытых грубообломочными отложениями или курумами, как правило, движутся по сети ложбин стока, аналогичных сети временных водотоков, дренирующих склоны, сложенные слабофильтрующими тонкодисперсными или крупнообломочными отложениями с глинистым заполнителем.

2. Глубина сезонного оттаивания под крупными ложбинами стока может быть значительно больше, чем на прилегающей территории, а соответственно, возрастают и объемы надмерзлотного стока. Расходы потоков надмерзлотных вод в ложбинах стока значительно выше. Это надо учитывать при постановке буровых работ, а также при оценке ореолов рассеяния.

3. На участках склонов, где по разрывным нарушениям есть сквозные водовыводящие талики, расходы надмерзлотных вод резко возрастают и, как правило, отмечаются участки разгрузки в виде нисходящих источников. На таких склонах продолжительность движения надмерзлотных вод в нижних частях склонов по ложбинам стока в курумах может быть очень продолжительной, а на отдельных участках существовать практически до конца зимнего периода. При подрезке склонов здесь возможно образование наледей надмерзлотных вод.

Дальнейшим направлением исследований является разработка комплексной методики изучения распространения и путей движения надмерзлотных вод с применением комплекса геофизических методов – СЭП-ВП и электротомографии. Это будет способствовать как более правильному размещению зарядных скважин, так и созданию эффективных дренажных сооружений для предотвращения подтопления участков ведения горных работ и инженерных сооружений.

Список литературы

1. Алексеев В.Р. Курумы – феномен криосферы. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2021. 348 с.
2. Банцкина Т.В., Михайлов В.М. К оценке роли внутригрунтовой конденсации водяных паров в формировании теплового и водного режимов крупнообломочных склоновых отложений // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII, № 1. С. 40–45.
3. Вельмина Н.А. Особенности гидрогеологии мерзлой зоны литосферы. М.: Недра, 1970. 328 с.
4. Железняк И.И., Мальчикова И.Ю., Шполянская Н.А. и др. Курумы Северного Забайкалья. Новосибирск: Наука, Сиб. отделение РАН, 1992. 182 с.
5. Каплина Т.И., Павлова О.П., Чернядьев В.П. и др. Новейшая тектоника и формирование многолетнемерзлых пород и подземных вод. М.: Наука, 1975. 124 с.
6. Тюрин А.И. Мерзлотно-фациальный анализ курумов. М.: наука, 1982. 150 с.
7. Шепелев В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск: Наука, 2011. 169 с.

ДИНАМИКА УРОВЕННОГО РЕЖИМА И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НАДМЕРЗЛОТНЫХ КРИОПЭГОВ В ГОДОВОМ ЦИКЛЕ (Г. ЯКУТСК)

Данзанова М.В., Байшев Н.Е., Огонеров В.В.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, dmv_1585@mail.ru

Аннотация. На территории г. Якутска с 80-х гг. проводятся режимные наблюдения за уровнем и гидрохимическим режимом надмерзлотных вод, в частности криопэгов. Ввиду отрицательного влияния криопэгов на грунты оснований и сооружений возникают вопросы о причинах увеличения минерализации техногенных криопэгов как по разрезу, так и в годовом и многолетнем циклах. Здесь представлены результаты многолетних исследований на нескольких участках на территории г. Якутска, где были вскрыты высокоминерализованные воды. Анализ режимных наблюдений показал, что характер изменения минерализации и уровня криопэгов в годовом цикле зависит от динамики метеорологических факторов и степени открытости системы, определяющих интенсивность водообмена и особенности промерзания.

Ключевые слова: техногенный криопэг, катионный и анионный состав, гидродинамический и гидрохимический режим, криогенный напор

Abstract. Since the 1980s the observations of level and hydrochemical regimes of underground water, including cryopeg are carried out in the Yakutsk city. Due to the negative impact of cryopegs on foundation soils and structures, questions arise about the reasons for the mineralization increase of technogenic cryopegs both in with depth and in annual and multi-year cycles. Here are presented the results of long-term research at several sites in the Yakutsk city where highly mineralized waters were discovered. Analysis of long-term regime observations revealed that cryopeg level changes in the annual cycle depends on the dynamics of meteorological factors and the degree of system's openness, which determine the intensity of water exchange and soil freezing characteristics.

Keywords: technogenic cryopeg, cationic and anionic composition, hydrodynamic and hydrochemical regimes, cryogenic pressure

Одной из главных причин нарушения устойчивости сооружений является изменение водно-теплового режима грунтов оснований из-за агрессивного воздействия высокоминерализованных вод – криопэгов, скапливающихся в сезоннопротаивающем слое пород под зданиями [4]. Негативная геологическая ситуация в связи с увеличением техногенной засоленности почвогрунтов, развитием процессов подтопления и образованием техногенных криопэгов ощущается в г. Якутске. Сотрудниками лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН с 1980 г. ведутся наблюдения за гидрогеохимическим и гидродинамическим режимом техногенных криопэгов на опытных площадках г. Якутска. Анализ многолетних наблюдений позволяет использовать выявленные закономерности на новых участках образования криопэгов. Гидродинамический режим надмерзлотных криопэгов изучался по данным ежемесячных замеров уровня, а также с использованием автоматических систем фиксации с периодичностью замеров четыре раза в сутки. Гидрогеохимические условия изучались посредством анализа основных химических компонентов водных проб, отобранных из скважин, вскрывших надмерзлотные криопэги в различных частях города.

Начиная с 80-х гг. прошлого столетия в долине Туймаада, объединяющей широкую пойму и две надпойменные террасы, были организованы режимные наблюдения на нескольких ключевых участках, различающихся по геоморфологическим и мерзлотно-гидрогеологическим условиям и видам техногенной нагрузки. Аллювиальные отложения мощностью до 20–25 м до глубины 3–6 м представлены льдистыми супесями, суглинками и мелкозернистыми песками пойменной фации, которые подстилаются разнотермическими русловыми песками. Абсолютные отметки рельефа изменяются от 85–94 м (высокая пойма) до 98–103 м (вторая надпойменная терраса). Глубина сезонного протаивания варьируется на разных площадках от 0.5 до 3.5 м. Среднегодовая температура грунтов на подошве слоя годовых теплооборотов (15–20 м) составляет около –2 °С.

Режимные исследования включали ежемесячные наблюдения в скважинах за уровнем и химическим составом криопэгов, а также температурой вмещающих их грунтов. Результаты проведенных исследований позволили выявить особенности формирования

техногенных криопэггов, проследить динамику их развития по площади и разрезу пород в годовом и многолетнем цикле.

Наиболее продолжительный цикл наблюдений (более 20 лет) был выполнен на участке второй надпойменной террасы р. Лены в пределах г. Якутска. Наблюдательный полигон был представлен пологим склоном небольшого эрозионного понижения, верхняя прибортовая часть которого занята строениями жилого комплекса. В северной и восточной части участка проложены два подземных тепловыделяющих трубопровода, с южной и западной стороны отсыпаны грунты под дачное строительство. В результате нарушения микрорельефа и условий стока погиб лес, росший в днище понижения, на локальных участках повысилась температура грунта.

Аллювиальные отложения здесь представлены до глубины 2.0–2.5 м супесями и суглинками, ниже залегают пески, зернистость которых увеличивается вниз по разрезу, и в основании толщ отмечается высокое содержание гальки. Глубина сезонного протаивания пород достигает 1.8–2.0 м. В результате инфильтрации загрязненных поверхностных стоков и концентрирования растворенных солей на глубине от 1.8 до 3.5 м сформировались линзы отрицательно-температурных (–0.8...–1.0 °C) высокоминерализованных вод мощностью до 3.5 м. Их химический состав представлен ниже:

$$M_{15} \frac{Cl66SO_4 29}{(Na + K)62Mg33}.$$

В результате диффузии ионов хорошо растворимых солей из верхнего горизонта в нижние слои толщ аллювиальных песков на глубине 17–19 м сформировалась линза криопэггов с минерализацией 26–30 г/дм³. Температура водонасыщенного грунта на этой глубине по данным замеров 2006 г. составляла –1.3 °C.

В условиях замкнутой системы, когда сток из талика отсутствует или затруднен, с началом промерзания покровных суглинков происходит небольшое понижение уровня и минерализации криопэггов вследствие миграции влаги из водонасыщенных пород к фронту промерзания. Выделение тепла при кристаллизации мигрирующей влаги несколько замедляет скорость промерзания сезонно-талых суглинков, которое завершается в конце февраля – начале марта. Промерзание подстилающих водонасыщенных песков (криопэггов) начинается, в зависимости от минерализации порового раствора, при температуре –0.5...–1.1 °C и в условиях замкнутой системы сопровождается отжатием солей в раствор. При этом минерализация криопэггов повышается в основном за счет хлоридов, сульфатов, натрия и магния. Формирующийся в процессе промерзания талика криогенный напор достигает максимальной величины (1.2–1.7 м) в мае – начале июля [2, 3].

В процессе протаивания пород (с конца мая по сентябрь – октябрь) при снятии криогенного напора уровень надмерзлотных криопэггов постепенно понижается, а минерализация воды несколько уменьшается за счет плавления льда. В августе – октябре отмечается небольшой рост уровня воды и снижение минерализации.

В химическом составе криопэггов повышается содержание сульфатов магния, а иногда и натрия, поступающих с инфильтратом поверхностных вод.

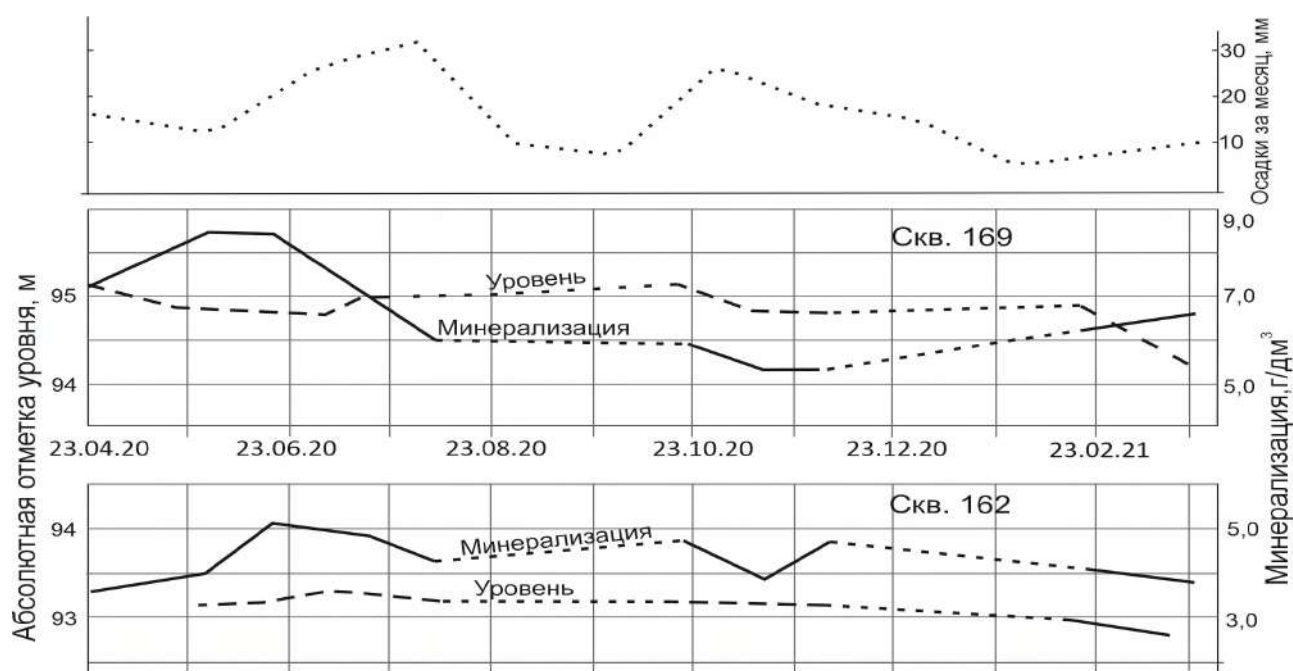
Несколько иной характер имеет режим криопэггов, формирующихся в условиях открытой системы. Падение уровня воды в них с осени до конца зимы, вплоть до полного осушения скважины, связано с ее оттоком в находящийся поблизости талик. Поэтому и минерализация в таких таликах понижается в связи не только с миграцией компонентов к фронту промерзания перекрывающих суглинков, но и с выносом растворенных веществ водным потоком. В указанных условиях в апреле – мае может произойти смыкание промерзающего слоя с многолетнемерзлыми породами. При протаивании летом вновь формируется водоносный слой с повышенной минерализацией за счет подтока загрязненных вод с водосборной площади.

Для сравнения полученных данных был проведен анализ гидрохимического и гидродинамического режимов на участке, где на относительно небольшой территории

(расстояние между скважинами, вскрывшими надмерзлотные криопэги, – 350 м) вскрыты надмерзлотные криопэги с относительно хорошими условиями стока и в условиях затрудненного водообмена. Поверхность участка исследований представлена выровненной строительными отсыпками территорией, где западная часть, по данным дешифрирования снимков прошлых лет и рекогносцировочного обследования, относится к старичной ложбине стока (скважина № 162), а восточная – к заболоченному участку. Этот заболоченный участок ввиду того, что со всех сторон огорожен грунтовыми, асфальтированными дорогами (скважина № 169) и техногенными насыпями, имеет застойный режим и затрудненный водообмен.

В целом, территория отсыпана песком средней крупности, мощность техногенных отложений изменяется от 1.1 (скв. № 169) до 4.5 м (скв. № 162). Подстилаются насыпные грунты песком мелким и средней крупности, переслаиваемыми супесями и суглинками коричневого цвета. Водонасыщенные грунты на заболоченной территории вскрыты в интервале глубин от 4.0 до 7.8 м (скв. № 169) и представлены песком мелким. В старичном понижении (скв. № 162) водонасыщенные, с примесью органических веществ, суглинки и пески мелкие вскрыты в интервале от 4.5 до 11.9 м. Подстилаются водонасыщенные грунты мерзлыми мелко- или среднезернистыми песками.

Минерализация подземных вод на данном участке зависит от водообмена и степени застойности режима. В условиях затрудненного водообмена (скв. №169), когда отсутствует сток поверхностных вод с заболоченной территории, минерализация подземных вод в летний период достигает 8.5 г/дм^3 (рисунок), а в химическом составе среди анионов преобладает хлор-ион (до 62.5 %-экв), среди катионов – натрий- и магний-ион (49.2 и 38.5 %-экв) соответственно) [1].



Режим надмерзлотных криопэгов скв. № 169 (заболоченная территория) и № 162 (старичная ложбина стока).

Проба воды, отобранная из самого болота, показала, что воды имеют гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатный натриевый состав с минерализацией 2.62 г/дм^3 . Наличие сульфатов и натрия в болотной воде свидетельствует об их загрязненности и застойности режима.

В условиях же с относительно хорошим стоком, где подземные воды имеют гидравлическую связь с поверхностными водами (в данном случае скв. № 162 в старичном понижении), минерализация подземных вод достигает 5.2 г/дм^3 в летний период года. В

химическом составе среди анионов преобладающую роль наряду с хлор-ионом занимают также гидрокарбонат- и сульфат-ионы, а среди катионов – ионы кальция и магния. Проба воды, отобранная из старицы, показала схожий с подземными водами химический состав – гидрокарбонатно-хлоридный кальциево-магниевый с минерализацией 2.6 г/дм³.

Анализ многолетних режимных наблюдений показал, что характер изменения химического состава и уровня криопэгов в годовом цикле зависит от динамики метеорологических факторов и степени открытости системы, определяющих интенсивность водообмена и особенности промерзания. Надмерзлотные криопэги, которые имеют связь с поверхностными водами, характеризуются меньшей минерализацией (max – 5.4 г/дм³) и смешанностью катионного состава. В замкнутых системах, где сток значительно затруднен, минерализация надмерзлотных криопэгов достигает 8.5 г/дм³, в анионном составе начинает преобладать хлор-ион, а в катионном – натрий- и магний-ионы.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований ИМЗ СО РАН №126020516689–6 «Подземные воды криолитозоны, особенности их взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами».

Список литературы

1. Данзанова М.В., Павлова Н.А. Режим надмерзлотных вод на территории аэропорта г. Якутск // Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы инженерной геодинамики. М., 2023. С. 223–225.
2. Данзанова М.В. Условия поверхностного стока и физические свойства сезонного слоя микрорайона "Мерзлотка" // Материалы конференции научной молодежи, посвященной 60-летию Якутского научного центра СО РАН и году молодежи РФ "Эрэл-2009", Якутск: Изд-во ООО РИА Феникс, 2009. С. 122–126 с.
3. Павлова Н.А., Данзанова М.В. Межгодовая изменчивость химического состава техногенных криопэгов на территории города Якутска // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII, № 6. С. 26–34.
4. Шепелев В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск: Академ. изд-во "Гео", 2011. 169 с.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКИСЛЕНИЯ РУДОНОСНОГО ПЛАСТА НА ДОБРОВОЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

Дедюлин И.Н., Василевский П.Ю., Шумихин В.М.
АО «ВНИПИПромтехнологии», Москва, Dedyulin.I.N@vnipt.ru.

Аннотация. В рамках анализа данных мониторинга опытных работ на ОУ-17 (опытный участок) Добровольного месторождения при освоении участка были выявлены проблемы, связанные с гипсовой кольматацией пласта и значительным снижением производительности участка. В результате опытные работы на участке ОУ-17 не позволили получить удовлетворительные данные для подготовки ТЭО (технико-экономическое обоснование) постоянных разведочных кондиций и предприятием было принято решение о продолжении опыта на смежном блоке ОУ-2. Физико-химическое термодинамическое моделирование было выполнено для обоснования выбора оптимального режима закисления рудоносного горизонта на ОУ-2, который позволит минимизировать кольматацию пласта. Моделирование проводилось в специализированном программном комплексе PHREEQC. В процессе работ были определены основные возможные источники Са, выполнен анализ возможного осадкообразования при различной кислотности ВР (выщелачивающий раствор).

Ключевые слова: месторождение урана, гидрогеохимическое моделирование, подземные воды, скважинное подземное выщелачивание, кольматация

Abstract While analyzing pilot data from OU-17 at the Dobrovolnoye deposit, problems were identified during site development related to gypsum colmatation of the formation and a significant decline in site productivity. As a result, pilot work at OU-17 did not yield satisfactory data for preparing a feasibility study for permanent exploration conditions, and the company decided to continue the experiment at the adjacent OU-2 block. Physicochemical thermodynamic modeling was performed to justify the selection of an optimal acidification regime for the ore-bearing horizon at OU-2, which would minimize formation colmatation. The modeling was conducted using the specialized PHREEQC software package. During the study, the main potential sources of Ca were identified and potential precipitation was analyzed under varying acidities of leach solutions.

Keywords: uranium deposit, hydrogeochemical modeling, groundwater, in-situ leaching, colmatation

Основной задачей настоящего исследования являлось применение термодинамического подхода для оценки возможности образования/растворения минералов и осадков в процессе взаимодействия технологических растворов с породами при различной кислотности ВР. Второй важной задачей являлось определение возможных источников поступления кальция, поскольку в рамках опытно-промышленных работ на смежном участке не были получены удовлетворительные данные для подготовки ТЭО постоянных разведочных кондиций. При этом одной из причин являлась гипсовая кольматация пласта и вызванное ей снижение производительности откачных скважин, хотя по имеющейся информации руды месторождения относятся к алюмосиликатному типу с низким содержанием Са (0.64 %).

Для выбора оптимального режима кислотности ВР и источников поступления Са при общей бедности его содержания в породах продуктивного горизонта было использовано физико-химическое термодинамическое моделирование. Моделирование проводилось в программном комплексе PHREEQC [7], позволяющем рассчитывать равновесие в гомогенных и гетерогенных системах. В результате моделирования можно получить индекс насыщения жидкой фазы (подземные воды, ВР, ПР (продуктивный раствор), их смеси), а также гетерогенной системы «жидкая фаза – твердая фаза (минералы вмещающих пород)» относительно широкого ряда порообразующих и техногенных минералов, термодинамические параметры которых представлены в базах данных, поставляемых с программой. Индекс насыщения показывает перенасыщение или недонасыщенность раствора по отношению к твердой фазе, соответственно показывая возможность либо образования осадка, либо растворения компонента.

В качестве исходных данных использовались данные геологоразведочных работ и результатов мониторинга процесса опытных работ на ОУ-17 [1, 4, 5]. В качестве основных Са-содержащих минералов были выбраны тремолит (Са-амфибол), диопсид (Са-пироксен),

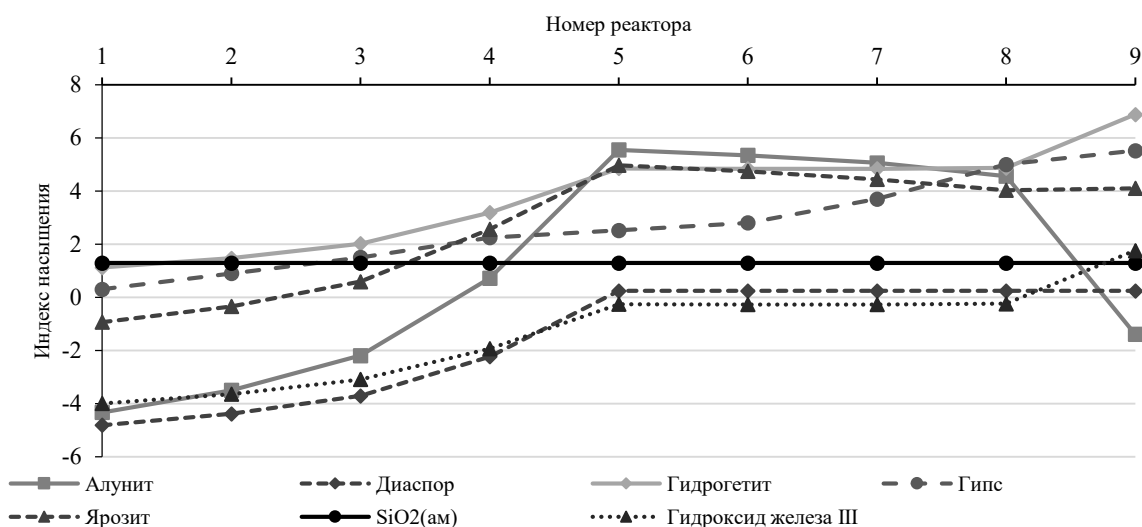
анортит (Са-плагиоклаз) и кальцит. Их содержание в общей минеральной массе было задано согласно данным минералогических исследований и суммарно составило 0.6 %.

Моделирование процесса выщелачивания осуществлялось методом последовательных реакторов [3, 6], в ходе которого раствор постепенно проходил через определенную на основании физико-механических свойств навеску породы. Затем полученный равновесный раствор поступал в следующую ячейку и так далее, в ходе чего происходило растворение минеральной составляющей и постепенная нейтрализация ВР (таблица). По результатам моделирования установлено, что представленные в твердой фазе кальцит, анортит, тремолит и диопсид полностью растворяются в ходе взаимодействия с ВР. Основными источниками Са на основании анализа индексов насыщения являются тремолит, диопсид и анортит, их индексы насыщения минимальны. При этом по данным минералогического анализа пироксена и амфибола в составе цемента в три раза суммарно больше, чем кальцита. При общей низкой карбонатности пород на практике существует проблема гипсовой кольматации пласта. По результатам термодинамического моделирования можно сделать вывод о том, что основными источниками кальция могут являться кальциевые пироксены, амфиболы и плагиоклазы, хотя с учетом практического опыта их растворение может занимать довольно длительное время [2].

Индексы насыщения основных породообразующих и новообразующихся минералов при прохождении ВР

Компоненты и минералы	Формула	Индекс насыщения (SI)								
		Реактор								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
рН		1.8	2	2.2	2.7	3.5	3.5	3.6	3.7	5.5
Eh, мВ		700	690	650	650	550	500	450	400	300
Альбит	NaAlSi ₃ O ₈	-11.39	-10.82	-9.93	-7.98	-4.68	-4.66	-4.62	-4.53	-2.69
Анортит	CaAl ₂ (SiO ₄) ₂	-28.64	-27.51	-25.74	-21.83	-15.24	-15.2	-15.12	-14.95	-11.28
Кальцит	CaCO ₃	-10.38	-9.82	-9.22	-8.14	-6.4	-6.28	-6.14	-5.92	-2.29
Коффинит	USiO ₄	-30.03	-29.7	-29.19	-28.03	-26.03	-25.96	-25.86	-25.66	-22.26
Иллит	(K,Mg,Al)(Al,Si) ₅ O ₁₀ (OH) ₂	-17.5	-16.36	-14.58	-10.65	-4.05	-4.02	-3.97	-3.87	-1.87
КППШ	KAlSi ₃ O ₈	-9.63	-9.06	-8.17	-6.21	-2.91	-2.88	-2.84	-2.75	-0.95
Каолинит	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	-10.11	-9.24	-7.9	-4.95	0	0	0	0	0
Мусковит	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	-18.78	-17.35	-15.12	-10.2	-1.96	-1.93	-1.89	-1.8	0
Кварц	SiO ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Уранинит	UO ₂	-29.24	-28.91	-28.39	-27.24	-25.24	-25.17	-25.07	-24.,86	-21.47
Диопсид	CaMgSi ₂ O ₆	-26.68	-26.15	-25.3	-23.38	-20.07	-19.98	-19.82	-19.46	-12.09
Тремолит	Ca ₂ Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	-42.77	-41.83	-40.34	-36.98	-31.18	-31.02	-30.73	-30.085	-17.16
Алунит	KAl ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂	-4.33	-3.5	-2.19	0.72	5.55	5.34	5.06	4.56	-1.39
Диапор	AlHO ₂	-4.81	-4.38	-3.71	-2.23	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Гидрогетит	FeOOH	1.12	1.47	2.02	3.19	4.85	4.84	4.84	4.87	6.88
Гидроксид железа III	FeOOH·nH ₂ O	-3.99	-3.64	-3.09	-1.93	-0.26	-0.27	-0.27	-0.24	1.76
Гипс	CaSO ₄ ·2H ₂ O	0.3	0.9	1.5	2.25	2.52	2.8	3.7	5	5.52
Ярозит	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	2.57	3.16	4.09	6.06	8.47	8.24	7.94	7,53	7.6
SiO ₂ (ам)	SiO ₂	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29

Из новообразующихся минералов по результатам термодинамического моделирования возможно выпадение гипса, аморфного кремнезема, гидрогетита, ярозита на первых стадиях нейтрализации, а также алунита гидроксида железа III при дальнейшем увеличении pH (рисунок).



Индексы насыщения основных новообразующихся минералов.

Для обоснования оптимальной кислотности ВР на стадии закисления ОУ-2 были проведены расчеты при различном содержании H_2SO_4 в растворе. Были рассмотрены варианты с кислотностью 2, 3, 5, 10 и 20 г/дм³. По результатам моделирования наблюдается перенасыщение системы по гипсу при кислотности более 10 г/дм³, что может приводить к его осаждению.

Список литературы

1. Авдонин Г.И., Сащенко А.В., Ануфриева С.И. и др. Отчет о результатах работ, выполненных по объекту «Лабораторные исследования керна контрольных скважин на опытно-промышленном участке Добровольного месторождения». М., 2025.
2. Белецкий, В.И., Богатков Л.К., Волков Н.И. и др. Справочник по геотехнологии урана М.: Энергоатомиздат, 1997. 672 с.
3. Лехов А.В. Физико-химическая гидрогеодинамика: учебник. М.: Изд-во МГУ, 2010. 500 с.
4. Лучинин И.Л., Мезенов И.А., Дементьев П.К. и др. Отчет Тургайской партии № 89 о результатах предварительной разведки Добровольного рений-редкоземельно-уранового месторождения в Северном Тургае. Екатеринбург, 1994.
5. Мешков Е.Ю., Воронцова О.М., Плотникова А.А. и др. — Отчет о НИР АО «ВНИПИПромтехнологии», Арх. № А-692-25. Технологическое сопровождение при эксплуатации опытно-промышленного участка месторождения «Добровольное». Этап 2.3.4. Обобщение геотехнологических показателей отработки блоков ОПУ за 2023–2025 гг. Подготовка исходных геотехнологических данных для разработки ТЭО кондиций. Проведения анализа эффективности выбранных параметров сети технологических скважин с использованием геотехнологического моделирования добычного комплекса Северского технологического института и выработка рекомендаций для сети скважин. Проведение анализа по выявлению застойных зон и выработка рекомендаций по местам заложения контрольных скважин. М., 2025.
6. Appelo C.A.J., Postma D. Geochemistry, groundwater and pollution. 2nd ed. Rotterdam: A.A. Balkema, 2005. 649 p.
7. Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. Description of input and examples for PHREEQC version 3—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43. 2013. 497 p.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ИЗЛИВОВ КИСЛЫХ ШАХТНЫХ ВОД КИЗЕЛОВСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА

Максимович Н.Г., Мизев А.А., Березина О.А., Деменев А.Д.

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь,
nmax54@gmail.com*

Аннотация. Рассматриваются экологические проблемы Кизеловского угольного бассейна, расположенного в восточной части Пермского края, связанные с изливами кислых шахтных вод. На территории бассейна зафиксировано 19 изливов шахтных вод общим дебитом около 25 млн. м³/год, которые негативно влияют как на водные объекты, так и на окружающую среду в целом. Исследования показали, что содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) в изливающихся шахтных водах превышает минимальные промышленные значения, особенно в водах шахт им. Ленина и им. Крупской. Разрабатываемая новая технология извлечения РЗЭ, таких как неодим, церий, иттрий, гадолиний и др., из кислых шахтных вод с одновременной очисткой этих вод имеет важное социально-экологическое и технологическое значение для региона и страны в целом.

Ключевые слова: *Кизеловский угольный бассейн, кислые шахтные воды, редкоземельные элементы, технология извлечения*

Abstract. The article describes the environmental problems of the Kizel Coal Basin, located in the east part of the Perm Region. This problems is caused by acid mine water (AMW). There are 19 AMW leachates in the Kizel Coal Basin with an average discharge of about 25 million m³/year. This AMW leachates negatively affect on surface water bodies, and the environment as a whole. The research has shown that amounts of rare earth elements (REE), contained in AMW, exceed the minimal industrial values, especially in the water of the Lenin and Krupskaya mines. The new technology of the extraction of REE, such as neodymium, cerium, yttrium, gadolinium, etc., AMW are being developed. This technology will simultaneously clean AMW, that is of great socio–environmental and technological importance for the region and the country.

Keywords: *Kizel Coal Basin, acid mine drainage rare -earth elements, extraction technology*

Разработка угольных месторождений приводит к существенному ухудшению экологической обстановки, что во многом обусловлено литолого-геохимическими особенностями угленосных формаций. Закрытие угледобывающих предприятий в ряде случаев приводит к еще большему ухудшению состояния окружающей среды.

Ликвидация шахт Кизеловского угольного бассейна (КУБ), расположенного на востоке Пермского края, завершившаяся в начале 2000-х гг., не привела к решению экологических проблем. Восстановление уровня подземных вод стало причиной появления изливов. В настоящее время на территории КУБ зафиксировано 19 изливов, суммарный объем которых составляет в среднем около 25 млн м³/год [8].

Кислые шахтные воды (КШВ) отличаются высоким содержанием таких элементов, как железо, алюминий, марганец, бериллий и некоторые другие. При впадении КШВ со значениями pH 2–3 в природные водотоки с pH 6–7 происходит формирование техногенных осадков, представленных преимущественно гидроокислами железа и алюминия, обогащенными микроэлементами. В настоящее время изливы шахтных вод продолжают оказывать выраженное негативное воздействие на водные экосистемы региона [2, 5].

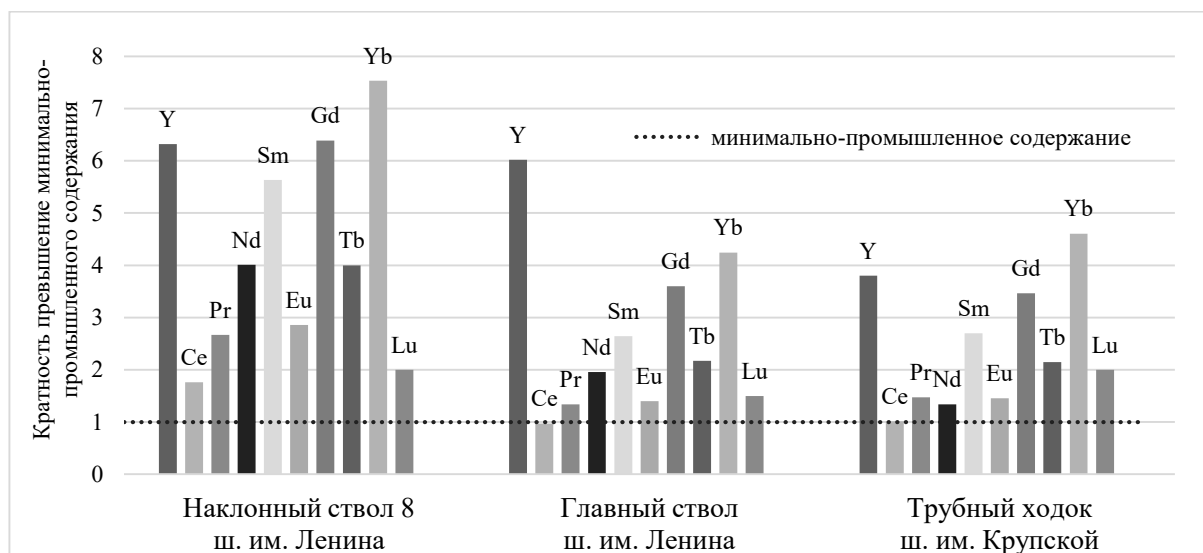
В настоящее время единственным официально рассматриваемым решением по прекращению негативного воздействия изливов кислых шахтных вод на окружающую среду является строительство очистных сооружений. Реализация данных мероприятий находится в ведении Министерства энергетики Российской Федерации. Согласно дорожной карте № ДП–П11–21810 от 10 июля 2024 г., начало строительства очистных сооружений на территории КУБ планируется не ранее августа 2029 г.

В то же время кислые шахтные воды представляют собой не только экологическую угрозу, но и потенциальный источник ценных компонентов [3, 7, 9–12]. В последние годы возрастает интерес к использованию техногенных объектов в качестве источников редкоземельных элементов (РЗЭ), что обусловлено их стратегической значимостью и высокой зависимостью от импорта.

Разработка новых месторождений, в том числе РЗЭ, является сложной и дорогостоящей задачей, требующей больших капитальных затрат и времени. Проводится геологическая разведка, создается инфраструктура (трубопроводы, дороги, линии электропередачи), данный этап занимает 5–6 лет. Для ввода месторождения в промышленную эксплуатацию также требуется время. Небольшие месторождения достаточно быстро исчерпывают запасы и, как правило, наносят значительный ущерб окружающей среде.

Получение РЗЭ сводится к обогащению руды и растворению концентрата, после чего проводят экстракцию для выделения соединений РЗЭ. В случае с водами изливов КУБ на последней стадии этого длительного процесса РЗЭ находятся в растворенном виде и с учетом мирового опыта, изливы КШВ будут существовать на протяжении не менее 100 лет с высокими концентрациями микроэлементов.

Исследования химического состава изливов КУБ показали, что в ряде случаев концентрации редкоземельных элементов существенно превышают минимально-промышленные значения. Наиболее перспективными по содержанию РЗЭ являются изливы шахт им. Ленина и им. Крупской (рисунок). Подобные результаты были получены при работе шахт КУБа, когда осуществлялся водоотлив в объемах около 100 млн м³/год [1, 4, 6].



Превышение минимально–промышленного содержания редкоземельных элементов в водах шахт им. Ленина и им. Крупской.

В настоящее время ведется разработка принципиально новой технологии первичного извлечения и концентрирования соединений редкоземельных элементов (неодим, церий, иттрий, гадолиний и др.) из изливов кислых шахтных вод Кизеловского угольного бассейна с одновременной их очисткой.

Таким образом разрабатываемая технология имеет высокую социальную и технологическую значимость как для Пермского края, так и для РФ с точки зрения улучшения экологической обстановки и с позиции повышения ресурсной базы страны для извлечения РЗЭ.

Список литературы

1. Грязнов О.Н., Палкин С.В., Новиков В.П., Вострокнутов А.Г., Катаева. Дренажные воды – источник техногенного гидроминерального сырья на Урале // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 1997. № 11–12. С. 58–65.
2. Деменев А.Д., Максимович Н.Г., Березина О.А., Мизев А.А., Хмурчик В.Т. Комплексный анализ качества поверхностных вод на основе данных дистанционного зондирования Земли, замеров автоматизированных датчиков и натурных исследований // Теоретическая и прикладная экология 2025. № 3.

С. 46–55.

3. Жаров Ю.Н., Мейтов Е.С., Шаров И.Г. Ценные и токсичные элементы в товарных углях России. М.: Недра, 1996. 240 с.

4. Клер В.Р., Волкова Г.А., Гурвич Е.М. и др. Металлогения и геохимия угленосных и сланцесодержащих толщ СССР. Геохимия элементов. М.: Наука, 1987. 239 с.

5. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2018. 288 с.

6. Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т., Березина О.А., Деменев А.Д., Мизев А.А. Формы миграции и накопления скандия и иттрия в реке, подверженной воздействию кислых изливов угольных шахт // Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной юбилеям директоров ГИН СО РАН Э.Г. Конникова и А.Г. Миронова. Улан-Удэ, 2025. С. 46–47.

7. Табаксблат Л.С. Распространение и миграционные возможности редкоземельных элементов в глубокотрансформированных шахтных водах Кизеловского угольного бассейна // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского, 2010. № 13. С. 300–306.

8. Торицова М.В. Агрессивные шахтные воды Кизеловского каменноугольного бассейна – источник скандия, иттрия, редких земель // Закономерности эволюции земной коры: Междунар. конф. С-Пб. гос. ун-т, 60 лет НИИЗК. Тез. докл. Т. 1. СПб., 1996. 224 с.

9. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Ценные элементы-примеси в углях. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 538 с.

10. Юровский А.З. Минеральные компоненты твердых горючих ископаемых. М.: Недра, 1968. 214 с.

11. Grawunder A., Merten D., Büchel G. Origin of middle rare earth element enrichment in acid mine drainage-impacted areas // Environ. Sci. Pollut. Res. 2014. Vol. 21, No. 11. P. 6812–6823.

12. Li Q., Ji B., Honaker R. et al. Partitioning behavior and mechanisms of rare earth elements during precipitation in acid mine drainage // Coll. Surf. A. 2022. V. 641. Article 128563.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАКАЧКИ ДРЕНАЖНЫХ РАССОЛОВ НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ КРИОЛИТОЗОНЫ (УЧАСТОК ОКТЯБРЬСКИЙ, СЕВЕРО-ЗАПАДНАЯ ЯКУТИЯ) НА ОСНОВЕ ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Мисайлов И.Е., Семенов В.П.

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск,
ventura-83@mail.ru*

Аннотация. В работе представлены промежуточные результаты применения геотермического метода для оценки степени воздействия закачки дренажных рассолов на состояние криолитозоны в районе участка Октябрьский на северо-западе Якутии. Получены современные данные о геотемпературном поле участка. В интервале отрицательных температур на температурных кривых выделены три области с различным знаком и величиной геотермического градиента. Установлена значительная неоднородность температурного поля горных пород, обусловленная сложным структурно-тектоническим строением участка и термодинамическими процессами, вызванными взаимодействием закачанных вод и рассолов с вмещающими породами.

Ключевые слова: геотермические исследования, криолитозона, рассолы

Abstract. This paper presents intermediate results of applying a geothermal method to assess the impact of drainage brine injection on the permafrost zone in the area of the Oktyabrsky site in North-West Yakutia. Current data on the site's geotemperature field have been obtained. Three distinct zones with different signs and magnitudes of the geothermal gradient have been identified within the negative temperature range on the temperature curves. Significant heterogeneity of the rock temperature field has been established, due to the complex structural and tectonic setting of the site and thermodynamic processes caused by the interaction of injected waters and brines with host rocks.

Keywords: geothermal research, permafrost, brines

В России использование природной подземной среды для размещения жидких токсичных стоков стало применяться с середины XX в. [7]. С середины 1990-х гг. началось активное обсуждение возможности использования криогенной толщи в качестве среды для подземной изоляции радиоактивных отходов [4, 5].

Разработка глубоких горизонтов кимберлитовых трубок АК «АЛРОСА» в 1990-х гг. обострила проблему водоотлива. Дренажные воды (рассолы), поступающие в карьеры, как правило, имеют хлоридно-натриевый или кальциевый состав с минерализацией от 100 до 400 г/дм³ и часто содержат бром, бор, литий, стронций и другие токсичные микроэлементы в концентрациях, значительно превышающих ПДК. Использование криолитозоны для их захоронения началось в тот же период [1–3, 8]. Исследователи сходились во мнении, что долгосрочная и надежная изоляция экологически опасных отходов в толщах мерзлых пород не только возможна, но и по ряду причин предпочтительнее, чем в талых породах. Надежность таких хранилищ определяется типом отходов, сроком их изоляции, а также воздействием на тепловую и механическую устойчивость мерзлых пород и их экранирующие свойства.

Проблема захоронения рассолов на месторождении трубки Удачная возникла в 1984 г. Район относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП) с температурой от –2.5 °С до –8.5 °С и мощностью криогенной толщи 700–1000 м [6]. Изначально планировался сброс дренажных вод в поверхностные накопители. Один из таких накопителей, позднее названный Октябрьским полигоном, был сооружен в 3.5 км к западу от карьера, на междуречье ручьев Сытыкан и Далдын. Мониторинг распространения вод по наблюдательным скважинам показал локальный характер обводнения мерзлого массива, однако по тектоническим нарушениям северо-западного простирания минерализованные воды мигрировали на значительные расстояния от точки сброса [3].

Октябрьский полигон подземного захоронения функционировал с 1986 по 2003 г. В этот период проводились опытно-промышленные эксперименты с участием специализированных организаций: «Якутнипроалмаз», ИЗК СО РАН, СПГИ, ИМЗ СО РАН. В результате была детально изучена технология захоронения в ММП незамерзающих при отрицательных температурах токсичных стоков.

Наблюдения за температурным режимом в скважинах полигона начались в августе 1985 г. По их результатам была выявлена динамика температурного режима криогенной толщи в процессе захоронения рассолов. Установлено, что в интервалах залегания поглощающих горизонтов в зависимости от режима сброса и сезона года возникают температурные аномалии. Это позволило выдвинуть идею о качественной оценке геоструктурных особенностей поглощающих толщ по характеру геотемпературных аномалий [2, 6]. Таким образом, изменение температуры ММП стало одним из ключевых критериев оценки миграции стоков.

Режимные наблюдения 1980–1990-х гг. показали, что в начальный период эксплуатации полигона повышения среднегодовой температуры массива в зоне поглощения не происходило, что подтвердило принципиальную возможность долгосрочного захоронения в криолитозоне. Более того, за первые два года в зонах коллекторов отмечалось понижение температуры в среднем на 1.8 °С.

Опорным методом в геокриологии для определения мощности многолетнемерзлой толщи и параметров геотемпературного поля являются замеры температуры в стволе скважины с восстановившимся (ненарушенным) температурным режимом. Температурные измерения на глубоких горизонтах проводились точечным методом с глубины 10–50 м с шагом 10–20 м в зависимости от геологического разреза и изменения геотермического градиента. Время выстойки датчика составляло от 30 до 120 мин в сухом стволе и от 5 до 15 мин в заполненном жидкостью. Глубина измерений определялась техническим состоянием скважин, максимально возможная для установок – 2000 м. При невозможности достичь подошвы мерзлой толщи ее положение оценивалось путем экстраполяции полученного геотермического градиента до изотермы 0 °С с учетом геологического строения [5].

В 2022 г. в пределах Октябрьского полигона было обследовано более 100 скважин, большинство из которых, как и сам полигон, ликвидированы. Геотермические измерения удалось выполнить в 11 скважинах, преимущественно на периферии полигона.

В характере температурных кривых (за исключением скважин с явно нарушенным режимом – № 65, 84, 42) в интервале отрицательных температур выделяются три области с разным знаком и величиной геотермического градиента: 1) область отрицательного градиента; 2) безградиентная или слабоградиентная область; 3) область положительного градиента в интервале отрицательных температур. Минимальные отрицательные температуры фиксируются на глубине 50–100 м. Согласно более ранним исследованиям в Сибирской платформе [5], такой характер кривых типичен для нестационарной, деградирующей сверху криогенной толщи.

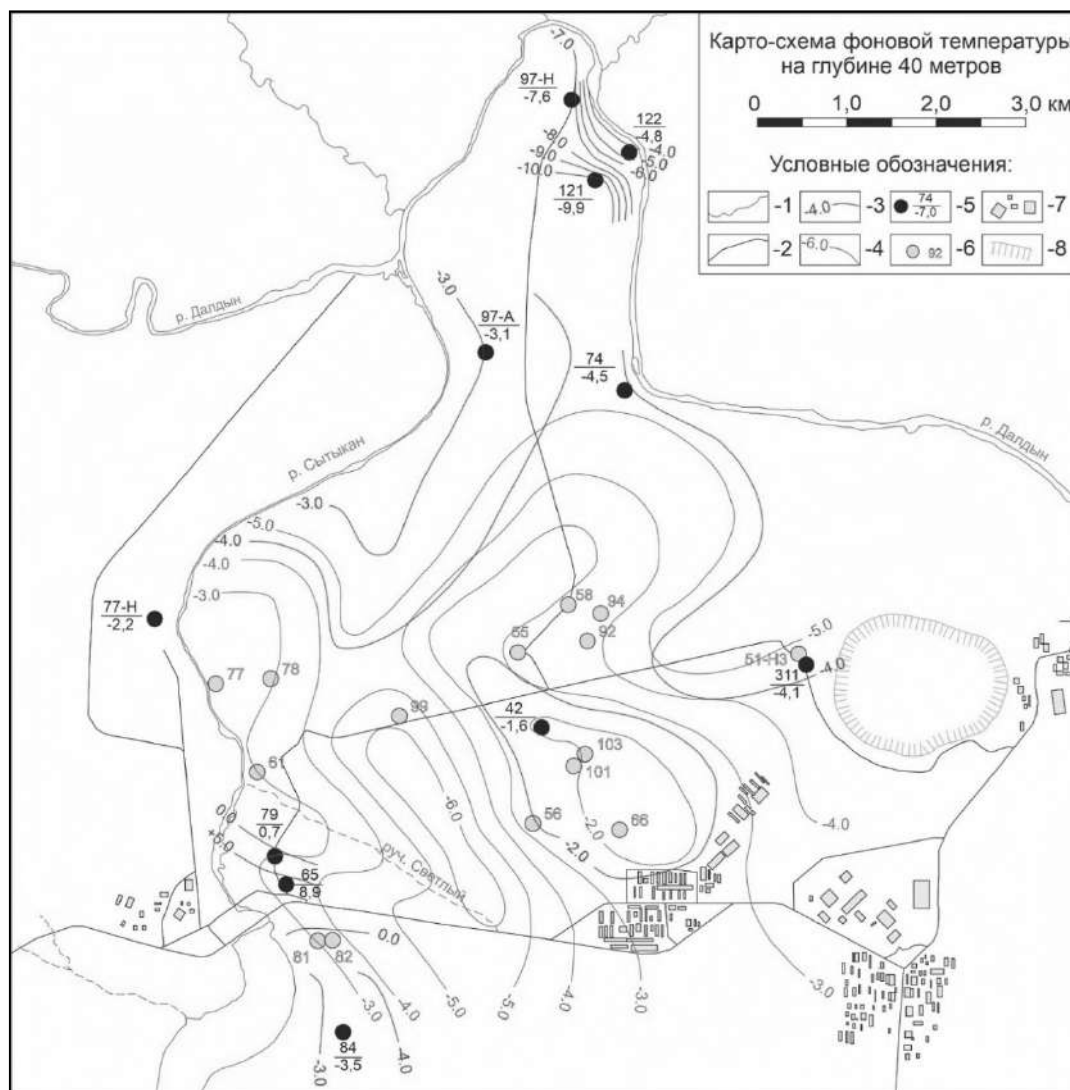
В скважинах центральной части полигона (№ 42, 311) и в скв. № 84 на глубине около 80 м наблюдается резкое увеличение градиента, что, вероятно, является границей восстановления естественного поля в этой зоне. Температурные кривые на периферии полигона (скв. № 121, 122, 74, 77-Н, 97-А) указывают на естественные или уже восстановившиеся после техногенного воздействия значения.

Деградационный характер кривых прослеживается до глубины от 50 до 116 м (в среднем 75 м), что, по нашему мнению, связано с глобальными климатическими изменениями в регионе за последние 30 лет. Результаты других исследований в регионе подтверждают, что в 1980–1990-х гг. подобный характер кривых не отмечался.

Минимальная температура на полигоне варьируется от –3.3 до –10.6 °С на глубине 50–100 м. Температура пород на глубине 15 м (подошва слоя годовых теплооборотов) изменяется от –1.3 до –4.4 °С. Фактически зафиксировать нижнюю границу криолитозоны в 2022 г. не удалось из-за недостаточной глубины замеров. Оценочная мощность ММП по данным скважин изменяется от 285 м (в долинах) до 820 м (на водоразделах).

Таким образом, в центральной части полигона температурное поле до сих пор не восстановилось до естественных значений, в то время как на периферии оно близко к фоновому.

Режимные геотермические исследования на полигоне сотрудниками ИМЗ СО РАН (И.В. Климовский, С.П. Готовцев и др.) проводились с 1985 по 1993 г. [2, 6]. Накопленные данные позволили составить схематическую карту температурного поля на глубине 40 м (рисунок), которая позднее была уточнена.



Карта температуры горных пород на глубине 40 м на участке Октябрьском (по данным 1993 г. с дополнениями 2022 г.)

1 – поверхностные водотоки; 2 – автодороги; 3 – изотерма по данным 2022 г.; 4 – изотерма по данным 1993 г.; 5 – скважины геотермических исследований 2022 г. (в числителе – номер, в знаменателе – температура на 40 м); 6 – скважины исследований (1985–1993 гг.); 7 – здания и сооружения; 8 – борта карьера.

Полученные данные свидетельствуют о том, что тепловая инерция техногенного воздействия сохраняется спустя 20 лет после окончания закачки. Отрицательная температурная аномалия, уверенно прослеживаемая с глубины 100 м (рисунок), пространственно совпадает с положением зон трещиноватости и тектонических нарушений в верхней части разреза, которые, по данным [3, 8], служили основными путями миграции закачиваемых рассолов в глубь массива.

На глубине 40 м в центральной части полигона наблюдается общее повышение температуры пород до 1 °С. В юго-западной части (скв. № 79, 65) на этой глубине зафиксированы положительные значения температуры, что указывает на наличие несквозного талика. Приуроченность этого участка к зоне влияния поверхностного водотока

(руч. Сытыкан/Далдын) в сочетании с техногенным прогревом при закачке могла создать условия для формирования локальной зоны с положительной температурой. В северной части, в скв. № 121, отмечена аномально низкая температура (-9.9°C). В соседней скв. № 122 поле близко к естественному. Оценить динамику по этим скважинам невозможно из-за отсутствия исторических данных.

С глубины 100 м зафиксировано понижение температуры более чем на 2°C , что, вероятно, обусловлено взаимодействием закачанных холодных рассолов с породами. Наличие пониженной температуры на границах полигона свидетельствует о значительном площадном распространении термального воздействия закачки.

Выводы:

1. Полученные промежуточные результаты раскрывают основные аспекты трансформации геотемпературного поля участка Октябрьского после почти 30-летнего перерыва в комплексных исследованиях.

2. В интервале отрицательных температур выделены три характерные области на температурных кривых: с отрицательным, близким к нулю и положительным геотермическим градиентом.

3. Установлена значительная пространственная неоднородность температурного поля, обусловленная сложным геологическим строением и термодинамическими процессами, вызванными длительной закачкой рассолов.

4. Полное восстановление естественного геотемпературного поля за 20 лет после окончания эксплуатации полигона не произошло. Значения, близкие к фоновым, отмечаются лишь на его периферии.

5. Выявлена разнонаправленная динамика: повышение температуры пород в верхней части разреза (до глубины ~ 80 м), вероятно связанное с современными климатическими изменениями, и ее понижение с глубины около 100 м. Последнее является прямым следствием техногенного воздействия от закачки холодных рассолов, так как именно этот интервал соответствует глубине залегания поглощающих горизонтов.

Работы выполнены в рамках НИОКТР 122011800062-5 «Тепловое поле и криогенная толща северо-востока России. Особенности формирования и динамика».

Список литературы

1. Балобаев В.Т., Володько Б.В., Девяткин В.Н. и др. Руководство по применению полупроводниковых терморезисторов для геокриологических измерений. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1985. 48 с.
2. Готовцев С.П., Климовский И.В. Влияние закачки дренажных вод на температуру мерзлых пород // Формирование подземных вод криолитозоны. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1992. С. 93–108.
3. Дроздов А.В. Природные и техноприродные резервуары промышленных стоков в криолитозоне (на примере якутской части Сибирской платформы). Якутск: Изд-во СВФУ, 2011. 416 с.
4. Ершов Е.Д., Комаров И.А., Чувиллин Е.М. Прогноз процессов взаимодействия жидких техногенных рассолов, захороняемых в массиве мерзлых пород // Геоэкология. 1997. № 2. С. 20–36.
5. Железняк М.Н., Семенов В.П. Геотемпературное поле и криолитозона Вилюйской синеклизы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2020. 123 с.
6. Климовский И.В., Готовцев С.П. Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1994. 168 с.
7. Новик-Качан В.П. Некоторые вопросы подземного захоронения жидких промышленных стоков // Советская геология. 1965. № 6. С. 122–130.
8. Сердюков Л.И., Артемьева Е.Л., Строгова Е.В. и др. О природе поглощающей способности многолетнемерзлых пород при захоронении в них дренажных рассолов // Горный журнал. 1996. № 7–8. С. 5–12.

РОЛЬ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ В ФОРМИРОВАНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КРУПНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ (НА ПРИМЕРЕ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЗОНЫ В ТАТАРСТАНЕ)

Мусин Р.Х., Галиева А.Р.

Казанский федеральный университет, Казань, Rustam.Musin@kpfu.ru

Аннотация. В статье рассматриваются гидрогеоэкологические условия Нижнекамской промзоны, включающей крупные предприятия нефтепереработки и нефтехимии. Показано, что загрязнение подземных вод носит исключительно локальный характер, что определяется высокими буферными свойствами геологической среды, современными технологиями производства и органической природой основного объема загрязняющих веществ, которые подвергаются хемо- и биодеструкции. Буферные свойства в первую очередь определяются преобладанием в верхней части разреза глинистых пород, обладающих значительными сорбционными свойствами, достаточно высокой эрозионной расчлененностью территории, определяющей короткие пути фильтрации, а также проявлением вертикальной гидрогеохимической зональности, обуславливающей повышенную мощность зоны развития подземных вод питьевого качества.

Ключевые слова: *буферные свойства среды, загрязнение подземных вод, самоочищение подземных вод, деструкция загрязняющих веществ, вертикальная гидрогеохимическая зональность*

Abstract. This article examines the hydrogeoecological conditions of the Nizhnekamsk industrial zone, which includes large oil refining and petrochemical plants. It is shown that groundwater pollution is purely localized, driven by the high buffering properties of the geological environment, modern production technologies, and the organic nature of the bulk of pollutants, which are subject to chemical and biodegradation. Buffering properties are primarily determined by the predominance of clayey rocks with significant sorption properties in the upper part of the section, the relatively high erosional dissection of the territory, which determines short filtration paths, and the manifestation of vertical hydrogeochemical zonation, which determines the increased thickness of the drinking-quality groundwater development zone.

Keywords: *buffering properties of the environment, groundwater pollution, self-purification of groundwater, destruction of pollutants, vertical hydrogeochemical zonation*

Геологическое разнообразие определяет широкий диапазон буферных (защитных) свойств окружающей среды. Минимизация рисков для жизнедеятельности людей в значительной степени определяется научно обоснованным выбором площадок для гражданского и промышленного строительства. В статье рассматриваются гидрогеоэкологические условия Нижнекамской нефтеперерабатывающей промзоны, являющейся одной из крупнейших в Европе.

Нижнекамская промзона начала функционировать в 1967 г. Здесь расположены такие промышленные гиганты, как ПАО «Нижнекамскнефтехим», ПАО «Нижнекамскшина», ОАО «ТАИФ-НК», АО «ТАНЕКО» и ряд более мелких предприятий. В настоящее время объем ежегодно перерабатываемой нефти превышает 16 млн т, а годовая стоимость выпускаемой продукции составляет многие сотни миллиардов рублей. Промзона расположена на достаточно высоком (абсолютные отметки 200–210 м) и широком залесенном водоразделе по левобережью р. Кама, восточнее г. Нижнекамска. Ее общая площадь не менее 20 км², превышение над базисом дренирования 150–160 м. Верхняя часть геологического разреза сложена платформенными комплексами полигенных пестроцветных карбонатно-терригенных образований уржумского, казанского и уфимского ярусов средней и нижней перми мощностью около 250 м [1, 8]. Общей особенностью рассматриваемой осадочной толщи является разнопорядковая ритмичность. Ритмы обычно начинаются песчаниковыми пачками, которые сменяются алевролитами и глинами, а завершаются карбонатными породами. Мощности прослоев отдельных литологических разностей редко превышают 5–7 м. Другой особенностью разреза является преобладание в нем глинистых пород, средневзвешенная доля которых в строении верхней 200-метровой части составляет 70 %. Венчает геологический разрез комплекс четвертичных элювиально-делювиальных суглинков мощностью 1–20 м. Промзона является областью развития межпластовых подземных вод (ПВ), формирующих типичные междуречные потоки. Области их питания являются

водораздельные пространства, а разгрузки – речные долины. Разноуровневые водоносные горизонты связаны нисходящим перетеканием. Мощность зоны пресных ПВ достигает 250–300 м. Поверхностная гидросеть в районе исследований представлена верховьями многочисленных ручьев. В меженное время их существование связано лишь с разгрузкой ПВ. Вышеотмеченные промпредприятия отличаются самыми современными технологиями переработки сырья, на них внедрена оборотная система водоснабжения; твердые, пастообразные и частично жидкие отходы складировются на полигонах захоронения отходов, хорошо оснащенных в инженерном отношении (дренажные системы, противофильтрационные завесы и др.); часть жидких отходов закачивается в поглощающие горизонты, залегающие в основании платформенного осадочного чехла на глубине около 1800 м; другая их часть перекачивается на биологические очистные сооружения [4, 6]. Максимально негативное воздействие предприятия промзоны оказывают на атмосферу. Величина выбросов составляет около 75 тыс. т/год. Приоритетными загрязнителями являются диоксид серы (26 %), диоксид азота (17 %), оксид углерода (15 %), смеси предельных углеводородов C1-C5, C6-C10 и C12-C19 (19 %) [10]. Эти выбросы определяют проявление неприятных запахов в пределах непосредственно самой промзоны и закисление атмосферных осадков. Последнее отмечается по южному залесенному обрамлению промзоны на расстоянии не менее 6 км от ее ограничения, где рН проб снегового покрова может составлять 4.89–5.60. В меньшей степени негативное воздействие сказывается на качестве ПВ первых от поверхности водоносных горизонтов. Так, на промплощадке одного из предприятий минерализация грунтовых вод достигала 1.25 г/дм³ при значениях общей жесткости и перманганатной окисляемости – 17.7 мг-экв/дм³ и 17.3 мг О/дм³, тогда как в природных условиях преобладающие значения указанных параметров практически не превышали 600 мг/дм³, 7–8 мг-экв/дм³, 3–4 мг О/дм³ [6]. Более интенсивно трансформирован состав грунтовых вод в районе действующего с 1982 г. полигона захоронения промышленных отходов ПАО «Нижекамскнефтехим», где минерализация может достигать 12.8 г/дм³, жесткость 74 мг-экв/дм³, а концентрации основных загрязнителей (мг/дм³): нефтепродукты – до 982, фенолы – 13.9, железо – 153. Интересно и важно, что на удалении 1.0–1.5 км от этого полигона по направлению фильтрационного потока, совпадающего с направлением поверхностного стока, признаки загрязнения как поверхностных, так и подземных вод отсутствуют [4, 13]. В пределах промплощадок уже на уровне второго от поверхности водоносного горизонта особенности состава ПВ приближаются к природным. Загрязнение грунтовых вод носит исключительно локальный характер. Подтверждением этого являются данные обработки площадных исследований ближайших (0.2–7.0 км) окрестностей Нижнекамской промзоны, характеризующихся широким развитием нисходящих родников, составы вод которых практически не претерпели каких-либо изменений во временном диапазоне 1979–2018 гг. (таблица) [3, 5].

Величина инфильтрационного питания ПВ в природных условиях территории промзоны на участках с уклоном земной поверхности 0.016 составляла 14.3 % от нормы атмосферных осадков в 554.6 мм/год [6].

Интегральные показатели состава родниковых вод в окрестностях промзоны

Период времени	Кол. проб	Минерализация, мг/дм ³	Жесткость, мг-экв/дм ³	Перманганатная окисляем., мг О/дм ³	Преобладающий тип воды
1979–1980 гг.	9	<u>382–510</u> 449±50	<u>3.8–6.0</u> 5.1±0.7	<u>1.1–5.7</u> 3.3±1.8	HCO ₃ Ca HCO ₃ Mg–Ca
1994–1999 гг.	27	<u>348–623</u> 490±61	<u>4.1–7.6</u> 5.4±0.8	<u>1.3–4.5</u> 2.3±1.0	HCO ₃ Mg–Ca
2018 г.	16	<u>417–587</u> 483±37	<u>3.0–6.3</u> 5.4±0.8	<u>0.5–4.1</u> 1.6±1.4	HCO ₃ Ca, HCO ₃ Mg–Ca

Примечание. В верхней строке числовых данных – предельные значения, в нижней – среднее и стандартное отклонение; наименование воды – согласно [7].

Сложение верхней части разреза слабопроницаемыми суглинками и планировка территории в пределах промплощадок привели к тому, что некоторые из них испытывают подтопление грунтовыми водами. Обработка данных режимных наблюдений за уровнями ПВ по наблюдательной сети одного из предприятий и проведение балансовых расчетов согласно [9] показали, что величина инфильтрационного питания ПВ на недренируемых участках достигла 27–31 % от нормы осадков, а на участках с наличием поверхностного лоткового дренажа с малым радиусом действия это питание – 22 % [6]. Суммарная величина испарения в природных ландшафтах рассматриваемого района составляет ~ 70–75 % от нормы осадков [9]. В природных условиях 10–15 % от последней приходилось на поверхностный сток, который на спланированных и недренируемых участках современных промплощадок полностью переведен в подземный сток, к которому добавляются утечки из разных водоводов и емкостей хранения. Так, величина питания грунтовых вод в пределах вышеупомянутого действующего полигона захоронения промышленных отходов ПАО «Нижнекамскнефтехим» через ~30 лет его функционирования достигла 37.5 % от нормы осадков [4]. Локальный характер развития загрязнения и негативной трансформации состава пресных ПВ в Нижнекамской промзоне связан с двумя основными факторами. Это сам локальный характер интенсивного техногенного воздействия (в первую очередь полигоны отходов, шламонакопители, в меньшей степени сами промплощадки), а также значительные буферные свойства геологической среды. Последние определяются преобладанием в геологическом разрезе глин, широким распространением карбонатных пород, а также довольно значительной эрозионной расчлененностью территории. Карбонаты нейтрализуют кислые атмосферные осадки, вероятность выпадения которых в этом районе очень высока, при этом нейтрализация будет проходить уже на уровне почвенного горизонта. Преобладание в разрезе глин определяет его высокую сорбционную емкость. На основе лабораторных определений методом Л.И. Кульчицкого [2] емкость поглощения пермских глин и четвертичных суглинков приближается к сорбционной активности монтмориллонита. Глинистые прослои в совокупности с эрозионной расчлененностью определяют короткие пути фильтрации для межпластовых ПВ верхней части разреза. Эти воды, формирование которых связано с инфильтрацией атмосферных осадков и, возможно, каких-то сточных вод или полигонных фильтратов, пройдя довольно ограниченный путь плановой фильтрации, на котором они подвергаются самоочищению за счет чистого инфильтрационного питания, сорбции, диффузии, дисперсии, начинают разгружаться в оврагах и малых речных долинах. Здесь процессы самоочищения продолжаются за счет разбавления чистыми водами (атмосферные, поверхностные), сорбции, хемо- и биодеструкции. Возможно, что процессы хемо- и биодеструкции играют определяющую роль в самоочищении загрязненных поверхностных и подземных вод. Это исходит из того, что основными загрязняющими веществами в данной промышленной зоне являются органические вещества (нефтепродукты, фенолы и др.), интенсивная деструкция которых проявлена на действующем полигоне промышленных отходов «Нижнекамскнефтехим» [4]. Если принять значение параметра деструкции (λ) нефтепродуктов равным 10^{-3} сут $^{-1}$ и использовать уравнение кинетики первого порядка [11]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\lambda * C, \quad C = C_0 e^{-\lambda t},$$

где C_0 – начальная концентрация мигранта (контаминанта), то при начальной концентрации нефтепродуктов в грунтовых водах на выходе с полигона отходов 1000 мг/дм ^{3} их содержание снизится до 0.1 мг/дм ^{3} за 9210 сут (25 лет). За это время загрязненный фильтрационный поток при существующих условиях должен пройти от ограничения полигона 1440 м, на всем протяжении которого он еще будет разбавляться чистым инфильтрационным питанием, минимальная величина которого составляет 67.57 мм/год. Локальный характер загрязнения ПВ отмечается и на многих других объектах, где основной объем загрязняющих веществ имеет органическую природу. В качестве ярких, хорошо изученных примеров можно привести полигон в эстонском Кохтла-Ярве, функционирующий с 1938 г. и вмещающий

$8 \cdot 10^7$ м³ отходов переработки горючих сланцев [14], а также закрытый полигон бытовых и промышленных отходов площадью 50 га в канадском г. Гамильтон [12].

Буферные свойства геологической среды проявляются и в том, что на территории Нижнекамской промзоны проявлена вертикальная гидрогеохимическая зональность. Вниз по разрезу в глубинном интервале 0–240 м происходит смена состава ПВ с гидрокарбонатного магниево-кальциевого на сульфатно-гидрокарбонатный натриевый. Данные изменения происходят за счет процессов ионного обмена и, в большей степени, за счет высаливания карбонатов кальция и магния, которое фиксируется с глубины 45–50 м. При этом минерализация ПВ варьируется в нешироких пределах – 400–600 мг/дм³. Данные изменения ведут к увеличению мощности зоны пресных ПВ до более чем 250 м и возможности получения вод благоприятного питьевого качества с глубины 150–240 м непосредственно с производственных площадок предприятий. Подтверждением сказанного является многолетняя работа одного из водозаборов, расположенного на северо-восточном ограничении промзоны, питьевое качество воды которого остается неизменным. Кроме этого, непосредственно на территории предприятий имеются одиночные скважины, воды которых при благоприятном питьевом качестве используются для технических целей [3, 5]. Таким образом, геоэкологически удачное местоположение Нижнекамской промзоны, а также применяемые современные технологии производства, органическая природа подавляющей части загрязняющих веществ, поступающих в окружающую среду и подвергающихся хемо- и биодеструкции, определяют довольно благоприятные условия для жизнедеятельности за пределами санитарно-защитной зоны комплекса крупнейших нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий.

Список литературы

1. Геология Татарстана: стратиграфия и тектоника / Под ред. Б.В. Бурова. М.: ГЕОС, 2003. 401 с.
2. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. М.: Изд-во МГУ, 1968. Т. 2. 370 с.
3. Мусин Р.Х., Галиева А.Р., Кудбанов Т.Г., Курлянов Н.А. Особенности влияния на гидросферу комплекса нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий в Нижнекамской промзоне Республики Татарстан // Нефтяное хозяйство. 2020. № 3. С. 108–112.
4. Мусин Р.Х. Особенности строения, функционирования и реконструкции полигона захоронения отходов ПАО «Нижнекамскнефтехим» // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2023. № 3. С. 76–87.
5. Мусин Р.Х., Галиева А.Р., Хамитов А.Д. Особенности трансформации во времени состава пресных подземных вод в Республике Татарстан // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 3. С. 427–446.
6. Мусин Р.Х., Галиева А.Р., Кудбанов Т.Г. Характер и степень трансформации гидрогеоэкологических условий на одной из современных промплощадок в Республике Татарстан // Геоэкология. 2020. № 2. С. 48–52.
7. Отраслевой стандарт. Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре. М.: ВСЕГИНГЕО, 1986. 12 с.
8. Сводная геологическая карта доплейстоценовых отложений Республики Татарстан масштаба 1:200000. Пояснительная записка. Казань: Изд-во «Арника», 1997. 118 с.
9. СТП ВНИИГ 210.01.НТ–2010 Методика расчета гидрологических характеристик техногенно-нагруженных территорий. СПб.: ВНИИГ, 2010.
10. Шагидуллин А.Р., Гилязова А.Ф., Амирянова Г.Ф., Магдеева А.Р., Шагидуллин Р.Р. Общая характеристика источников загрязнения атмосферного воздуха города Нижнекамска // Российский журнал прикладной экологии. 2015. № 3. С. 30–35.
11. Шестаков В.М., Поздняков С.П.. Геогидрология. М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 176 с.
12. Barker J.F. Groundwater contamination at a landfill sited on fractured carbonate and shale / J. F. Barker, J. E. Barbash, M. Labonte // Journal of Contaminant Hydrology. 1988. Vol. 3. P. 1–25.
13. Musin R.Kh., Kurlyanov N.A., Kalkamanova Z.G., Korotchenko T.V. Environmental state and buffering properties of underground hydrosphere in waste landfill site of the largest petrochemical companies in Europe // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 33, Is.1. Art. № 012019.
14. Vallner L. Gavrilova O., Vilu R. Environmental risks and problems of the optimal management of an oil shale semi-coke and ash landfill in Kohtla-Järve, Estonia // Science of The Total Environment. 2015. Vol. 524–525. P. 400–415.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОДЗЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ ДЖИДИНСКОЙ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ СИСТЕМЫ

Плюснин А.М., Гарипова Е.Р.

Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, plusnin-53@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрено воздействие сточных вод горнодобывающего производства на химический состав рек Модонкуль и Мыргэншено, которые являются притоками реки Джиды, имеющей рыбохозяйственное значение для Республики Бурятия. Установлены причины формирования большого количества взвешенного материала, поступившего в реки в 2019 и 2022 гг, в результате чего реки окрасились в оранжевый и белый цвет. Подробно изучен механизм изменения pH среды при разгрузке штольневых вод на земную поверхность, исследовано влияние изменения форм нахождения элементов на их миграционную способность. Исследованы закономерности формирования твердых фаз при взаимодействии штольневых, сточных и подрусловых вод с речными водами. Приведен химический состав образовавшихся осадков, за счет которых сформировалась окраска рек.

Ключевые слова: отходы добычи, окисление сульфидов, реки, подрусловые воды, разгрузка, высвобождение минералов, взвешенные вещества

Abstract. This article examines the impact of mining wastewater on the chemical composition of the Modonkul and Myrgensheno Rivers, tributaries of the Dzhida River, which is important for fisheries in the Republic of Buryatia. The causes of the large amounts of suspended matter entering the rivers in 2019 and 2022, resulting in the rivers' orange and white colors, are determined. The mechanism of pH changes during the discharge of adit water onto the surface is studied in detail, and the impact of changes in elemental forms on their migration capacity is investigated. Patterns of solid phase formation during the interaction of adit, wastewater, and substream water with river water are investigated. The chemical composition of the resulting solid phases responsible for the rivers' coloration is presented.

Keywords: mining waste, oxidation, streams, substream water, discharge, mineral precipitation, suspended matter

Джидинская природно-техногенная система сформировалась при разведке и отработке россыпей золота, вольфрама и коренных вольфрамовых месторождений Холтосон, Инкур и Первомайского молибденового месторождения. Разработка велась Джидинским вольфрамо-молибденовым комбинатом с 1934 по 1997 г., вначале с использованием штолен, а затем с помощью двух карьеров [2]. Природно-техногенная система располагается в междуречье рек Модонкуль и Мыргэншено, которые впадают в р. Джиду. После закрытия Джидинского вольфрамо-молибденового комбината на этой территории остались нерекультивированными отходы добычи руд, которые складированы в приводораздельной части руч. Инкур, рек Модонкуль, Мыргэншено. Из разведочных штолен в верховье руч. Инкур и в среднем течении р. Модонкуль изливаются рудничные воды.

Наряду с постоянным негативным воздействием, реки периодически подвергаются загрязнению, связанному с залповым выбросом растворенных в воде и находящихся во взвешенном состоянии токсичных веществ. Так, в 2019 г. р. Модонкуль подверглась катастрофическому загрязнению при прорыве перемычки в штольне «Западная». На протяжении нескольких суток вода была окрашена взвешенным материалом в оранжевый цвет. Химический анализ взвешенного материала показал, что он в основном состоит из оксидов железа ($\text{Fe}_2\text{O}_3=43.3 \%$, $\text{FeO}=0.44 \%$). Во взвеси также обнаружен кремний ($\text{SiO}_2=18.2 \%$), алюминий ($\text{Al}_2\text{O}_3=10.6 \%$) и фторид (1.63%). В 2022 г. р. Мыргэншено окрасилась переносимой взвесью в белый цвет. Взвешенный материал стал формироваться в реке при впадении в нее руч. Гуджирка. Химический анализ взвеси показал, что она состоит в основном из кремния ($\text{SiO}_2=48.4 \%$), алюминия ($\text{Al}_2\text{O}_3=16.8 \%$), оксидов железа ($\text{Fe}_2\text{O}_3=6.97 \%$, $\text{FeO}=4.12 \%$) и оксидов магния (8.0%), кальция (2.02%) и натрия (3.09%). Переносимый реками взвешенный материал частично отложился на берегах рек и продолжает оказывать негативное воздействие на экологическое состояние района за счет ветрового переноса. В зимний период под воздействием ветра эта тонкая взвесь попадает в снежный покров, при таянии снега переносится в р. Джиду. В целом можно констатировать,

что экологическая обстановка в районе остается неблагоприятной и оказывает негативное воздействие на проживающее здесь население и животных.

С целью выявления источников, с которыми связано загрязнение водных объектов, и установления основных процессов, обуславливающих особенности миграции токсичных элементов в водной среде, был исследован химический состав рек Мыргэншено, Модонкуль, Джиды, руч. Гуджирка. Из рудничного ручья штольни произведен отбор проб воды в девяти точках наблюдения. Для исследования загрязнения подрусловых вод были пробурены скважины в долине р. Мыргэншено.

Установлено, что в процессе миграции водных растворов меняются формы нахождения многих химических элементов, изменяется степень окисления железа, марганца, химические элементы гидролизуются, происходит образование труднорастворимых соединений. Из штольни «Западная» круглый год вытекают рудничные воды, дебит их меняется от 35 до 50 л/с. По мере движения воды вниз по склону быстро меняется pH растворов. На устье штольни pH воды составляет 5.47, в 100 м ниже pH равно 5.3, еще через 300 м pH становится равным 5.18. Такое резкое закисление воды связано с активно протекающим процессом окисления железа в степени окисления +2 до +3 и реакцией гидролиза последнего. На всем протяжении ручья происходит высаживание труднорастворимых соединений, представленных в основном гидроксидами железа. При смешивании воды штольневого ручья с водой р. Модонкуль pH возрастает до 6.16, происходит образование тонкой взвеси, представленной гидроксидами железа, марганца, гипсом. За счет образования взвеси вода становится мутной и в таком состоянии находится до впадения в р. Джиду. Средние содержания химических элементов в донных отложениях ручья, вытекающего из штольни «Западная», следующие: Fe – 17.2 %, F – 4.4 %, S – 3.2 %, Cu – 1589 г/т, Pb – 920 г/т, Zn – 364 г/т, Ni – 22 /т, Mo – 22 г/т, As – 8.2 г/т.

Хранилище отходов добычи, сформированное при разработке месторождений Инкур и Первомайское, расположено в долине руч. Гуджирка. Хранилище расположено на крутом склоне, обращенном к долине руч. Здесь хранятся вскрышные породы и некондиционные руды. Породы представлены глыбовым и песчаным материалом, размер глыб различный от 1–1.5 м до 20–30 см. Отложения хорошо проницаемы для поверхностных и атмосферных вод. В летний период в отложениях отходов добычи происходит конденсация влаги. У подножия склона происходит разгрузка конденсационных вод в виде источников и далее формируется руч. Гуджирка.

В руч. Гуджирка установлено высокое содержание сульфат-иона, что указывает на интенсивное окислительное разрушение остаточной рудной минерализации. В результате окисления пирита в поровом пространстве отходов добычи образуются кислые воды, которые активно взаимодействуют с породами отвалов. В растворе накапливаются железо, кальций, магний, фторид-ион, кремниевая кислота. Вероятно, значительная часть продуктов разрушения пород мигрирует в форме коллоидов, что проявляется в значительном превышении количества сухого остатка над общей минерализацией. В коллоидном состоянии может мигрировать золь кремниевой кислоты, глина, гидроокислы железа, марганца. Часть поверхностного стока в долине руч. Гуджирка переводится в подземный сток, который в виде подрусловых вод разгружается в долине р. Мыргэншено. Эти воды, в отличие от поверхностного стока, содержат высокие концентрации железа в степени окисления +2 и фторид-ион. Под воздействием подземного и поверхностного стока с отходов добычи вольфрам-молибденовых руд химический тип воды в р. Мыргэншено изменяется с хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатного натриево-магниевое-кальциевого на сульфатный магниевое-кальциевый. Микроэлементный состав поверхностных и подземных вод представлен в таблице. В микроэлементном составе руч. Гуджирка в наиболее значительном количестве присутствуют продукты окисления руд, сопутствующих вольфрамовой минерализации. При окислении сульфидов в раствор поступили медь, цинк, железо, кобальт, никель, кадмий. Марганец поступает в раствор при взаимодействии кислых вод с родохрозитом, который сопутствует формированию вольфрамовой минерализации.

Алюминий, вероятно, поступает в раствор при взаимодействии кислых вод с полевыми шпатами. Вольфрам и молибден, которые, несомненно, присутствуют в отходах добычи в виде вольфрамита, гюбнерита и молибденита, не накапливаются в растворе, так как плохо мигрируют в кислой среде. По мере миграции в ручье содержание микроэлементов снижается за счет разбавления свежими порциями воды и образования твердых фаз – гипса, магнезита, железного купороса. Алюминий хорошо мигрирует в кислой среде в виде катиона, но при возрастании pH он гидролизует, образуя гидроксид в виде золя.

Микрокомпонентный состав поверхностных и подземных вод в районе исследования в сравнении с ПДК_{рхн}, мкг/дм³

№ пробы	Al	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
Верховье р. Мыргэншено	13.2	10.3	50	0.2	1.8	3	4.3	0.042	1.1
Исток руч. Гуджирка	2000	42000	1230	2400	1010	48000	32000	740	39
Устье руч. Гуджирка	2000	32000	22000	1850	880	33000	28000	600	30
Р. Мыргэншено 100 м ниже руч. Гуджирка	230000	13000	1240	680	370	11100	10300	230	6,5
Подрусловые воды руч. Гуджирка	-	20980	13235	243	212	7,6	829	20.0	-
ПДК[1]	40	10	100	10	10	1,0	10	5	6

Примечание. ПДК_{рхн} – предельно допустимые концентрации вредных веществ в водах объектов рыбохозяйственного значения

В подрусловых водах химические элементы мигрируют в восстановленных формах, поэтому в наиболее высокой концентрации установлены марганец и железо, для которых характерна интенсивная миграционная способность в степени окисления +2.

В верхнем течении р. Мыргэншено не испытывает воздействия отходов добычи вольфрам-молибденовых руд, ее химический состав формируется при протекании природных процессов. При впадении в нее руч. Гуджирка и разгрузке подрусловых вод резко изменяется макро- и микроэлементный состав. Вероятно, при смешивании природных и техногенных вод меняются формы миграции многих химических элементов. Из золь образуются взвесь кремниевой кислоты, глин. Из растворов формируются гипс, сульфат алюминия, образуются гидроксиды железа, марганца, алюминия. На поверхности образующихся твердых фаз сорбируются многие микроэлементы.

Длительное хранение отходов добычи рудных месторождений без проведения рекультивационных работ приводит к глубокой переработке горных пород процессами выветривания, в результате чего образуются подвижные формы многих химических элементов, способных мигрировать в водной и воздушной среде. При хранении происходит постоянное рассеивание токсичных веществ на окружающей территории и создаются условия для катастрофического загрязнения территории при неблагоприятной климатической обстановке. Произошедшая в 2029 и 2022 гг. миграция взвешенного материала в реках Модонкуль и Мыргэншено показывает, что количество накопленного тонкодисперсного материала в их бассейнах может сформировать сход селей. Необходимо проведение инженерных мероприятий для защиты г. Закаменска и окружающей территории от воздействия этого негативного физико-геологического явления.

Исследование выполнено по госбюджетному проекту № 126020216348-5.

Список литературы

1. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах объектов рыбохозяйственного значения».
2. Смирнова О.К., Плюснин А.М. Джидинский рудный район (проблемы состояния окружающей среды). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2013. 181 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ РАСТВОРЕННЫХ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ НА ТЕРРИТОРИИ БАЙКАЛЬСКОГО ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО КОМБИНАТА

Сорокоумова Я.В., Расторгуев А.В.

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет,
sorokoumovayv@my.msu.ru*

Аннотация. В работе приведены результаты исследования миграции растворенных загрязнителей в подземных водах территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината. На основе трехмерного моделирования показано, что загрязнение имеет инерционный характер, так что даже после остановки производственной деятельности законсервированные в геологической среде первичные очаги загрязнения продолжают питать миграционные ореолы загрязнителей, которые разгружаются в донные отложения и акваторию озера.

Ключевые слова: миграция загрязнителей, Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат, оз. Байкал

Abstract. This study presents the results of the dissolved contaminants migration in the groundwater at the site of the Baikalsk Pulp and Paper Mill. Three-dimensional simulation modeling demonstrates that the contamination exhibits a persistent inertial behavior. Consequently, even after the cessation of industrial operations, the primary contaminant sources, which remain encapsulated within the geological matrix, continue to sustain contaminant plume migration. These plumes ultimately discharge into the lake's bottom sediments and its water.

Keywords: contaminant migration, the Baikalsk Pulp and Paper Mill, Lake Baikal

Одним самых значимых источников поступления техногенных веществ в воды оз. Байкал является территория Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) [1, 6], который функционировал в период 1964–2013 гг. Площадка предприятия расположена на юго-западном побережье оз. Байкала в Слюдянском районе Иркутской области в г. Байкальске, в пределах центральной экологической зоны байкальской природной территории, выделенной в ходе экологического зонирования Институтом географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. На этой территории, согласно закону РФ № 94-РФ от 01.05.1999 «Об охране озера Байкал», хозяйственная деятельность регулируется с целью охраны поверхностных и подземных вод, разгружающихся в озеро. Соответственно, текущее техногенное воздействие, обусловленное производственными процессами на этом участке побережья, должно быть минимизировано, а уже сформировавшееся за счет ранее осуществляемой деятельности загрязнение должно быть устранено. По данным мониторинга состава подземных вод, проведенного в 2020 г., содержание растворенных нефтепродуктов в подземных водах достигает 17 мг/дм³ (ПДК для БПТ 0.05 мг/дм³), минерализация подземных вод – более 4.6 г/дм³ (фон – 0.2 г/дм³), что свидетельствует об активном загрязнении подземных вод даже после остановки предприятия, а ввиду того, что поток подземных вод направлен в сторону оз. Байкал, загрязнители поступают и в его донные отложения, а через них – и в воду.

Рассматриваемая территория относится к первой террасе озера, осложненной пролювиальными конусами выноса по долинам рек Утулик и Солзан [2]. На территории распространен неоген-четвертичный водоносный комплекс, водовмещающие отложения которого мощностью несколько сотен метров [7] представлены плохо отсортированными гравийно-галечниковыми и валунно-галечниковыми отложениями с включением линз и прослоев песчаного, супесчаного и иногда суглинистого состава. В плане горизонт представляет ограниченную область, приуроченную к Утуликской впадине, шириной до 3.7 км между отрогами хребта Хамар-Дабан и оз. Байкал. Питание осуществляется в основном за счет атмосферных осадков, разгрузка – в оз. Байкал. Подземные воды данного горизонта по химическому составу гидрокарбонатные, с минерализацией до 0.2 г/дм³, среднегодовая температура составляет 6 °С. Коэффициент фильтрации, по данным опытно-фильтрационных работ, варьируется в широких пределах – от единиц до сотен м/сут,

калибровка модели оптимизации перехватывающего дренажа [3] показала значение 34 м/сут при водоотдаче 0.25.

Для решения моделирования массопереноса на территории БЦБК была разработана трехмерная геомиграционная модель в программном комплексе Visual Modflow [5]. Моделируемая область представляет собой участок берега оз. Байкал, охватывающий известные очаги загрязнения. Пространственная структура потока подземных вод первого от поверхности водоносного комплекса неоген-четвертичных отложений имеет трехмерную форму ввиду наличия деформаций линий тока, связанных с формированием депрессионной воронки при работе перехватывающего водозабора. Основное направление потока подземных вод в сторону региональной дрены – оз. Байкал, характер поверхности потока – безнапорный. Внутренним граничным условием на модели является перехватывающий водозабор, представленный восемью скважинами глубиной 35–70 м, который функционировал 12 лет с неравномерным дебитом.

В процессе эпигнозного моделирования рассматривался период 7528 сут (2002–2022 гг.), что позволяет воспроизвести наиболее полный массив данных с результатами наблюдений за уровнем подземных вод, а также мониторинга состава подземных вод.

В ходе калибровки модели уточнялось инфильтрационное питание на выявленных участках повышенной техногенной инфильтрации между главным корпусом БЦБК и зданием ТЭЦ, а также в карте № 11. В результате диапазон вариации нормализованной ошибки при сопоставлении модельных и наблюдаемых уровней подземных вод для всех стресс-периодов составил ~10–18 %.

В качестве начальных условий для последующих геомиграционных расчетов во все слои модели задавались экстраполированные данные мониторинга за 2002 г., а в нижний модельный слой, а также на западной и восточной границе модели задавались фоновые значения.

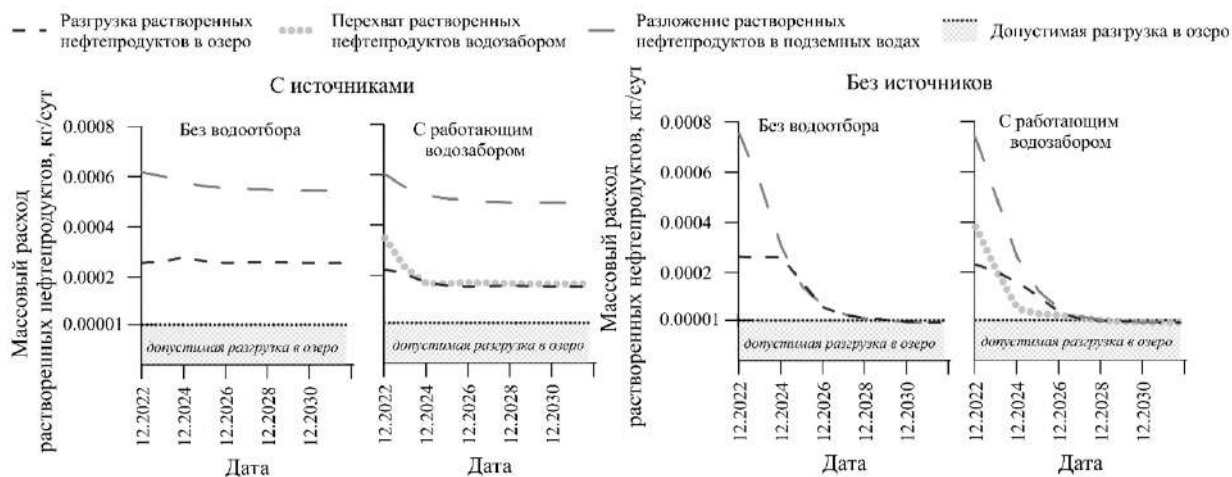
Решение эпигнозной задачи моделирования миграции консервативного мигранта показало достаточную сходимость с массивом фактических данных (по значению минерализации), с диапазоном изменения нормализованных среднеквадратичных ошибок (НСКО) на весь период эпигнозных расчетов – 12.3–15.7 %. Была оценена значимость вклада перехватывающего водозабора и источников загрязнения в разгрузку растворенных минеральных веществ в Байкал.

Проведены прогнозные расчеты для определения распространения минерального загрязнения, реализованные в двух постановках: первая, при которой источники загрязнения остались неизменными; вторая предусматривала извлечение источников поступления загрязнения. Каждая постановка включала два варианта с запуском перехватывающего водозабора и без него. Показано, что в первой постановке разгрузка растворенных минеральных веществ через 10 лет будет выше фонового значения на 35 %, а при работающем перехватывающем водозаборе – на ~15 %, при этом, кумулятивная масса разгрузившихся минеральных веществ будет ниже на ~20 %, чем в варианте без водоотбора. В результате расчетов, согласно второй постановке, показано, что разгрузка растворенных минеральных веществ в озеро достигнет фонового значения спустя восемь лет, при этом при функционирующем перехватывающем водозаборе на год раньше, а кумулятивная масса разгрузившихся минеральных веществ будет ниже на ~5 %, чем в варианте без водоотбора.

Калибровка модели переноса растворенных нефтепродуктов показала большее количество источников поступления загрязнения, чем для модели переноса растворенного минерального загрязнения [4]. Диапазон изменения НСКО на весь период эпигнозных расчетов составил 15.5–17.3 %. Эпигнозные расчеты показали, что основное уменьшение количества растворенных нефтепродуктов в подземных водах территории БЦБК связано с процессами биоразложения, описание которых производилось согласно минимальному из характерных значению константы деструкции (с учетом литературных данных).

Проведенные прогнозные расчеты (рисунок) для двух вариантов реабилитации территории показали, что в первой постановке разгрузка растворенных нефтепродуктов

через десять лет будет выше фонового значения на порядок, как и при работающем перехватывающем водозаборе, при этом кумулятивная масса разгрузившихся нефтепродуктов будет ниже на ~15 %, чем в варианте без водоотбора. В результате расчетов, согласно второй постановке, показано, что разгрузка растворенных нефтепродуктов в озеро достигнет фонового значения спустя семь лет, при этом при функционирующем перехватывающем водозаборе на два года раньше, а кумулятивная масса разгрузившихся минеральных веществ будет ниже на ~5 %, чем в варианте без водоотбора.



Сопоставление вариантов прогнозной разгрузки растворенных нефтепродуктов.

Разработанная трехмерная геомиграционная модель массопереноса контаминантов на территории БЦБК удовлетворительно воспроизводит имеющиеся данные 20-летнего мониторинга неоген-четвертичного водоносного комплекса по уровням подземных вод, по минерализации и по содержанию растворенных нефтепродуктов. Установлено положение и режим основных источников растворенного загрязнения на площадке предприятия. Проведены прогнозные расчеты для двух вариантов реабилитации территории, которые показали значительный вклад действующих на данный момент источников загрязнения в разгрузку в оз. Байкал.

Список литературы

1. Афонина Т.Е. Потоки углеводородных соединений в оз. Байкал, процессы их накопления и преобразования в донных осадках: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М., 2005. 36 с.
2. Макаров С.А. Современный морфолитогенез на юге Восточной Сибири: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М., 2016. 44 с.
3. Расторгуев А.В., Куранов П.Н. Обоснование защиты озера Байкал от загрязнения подземными водами // Современные проблемы гидрогеологии и гидрогеомеханики: Сборник докладов конференции, посвященной памяти члена-корреспондента РАН В.А. Мироненко, 2002. С. 141–146.
4. Сорокоумова Я.В., Расторгуев А.В. Моделирование миграции растворенных нефтепродуктов в грунтовых водах на территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината // Инженерная геология. 2023. Т. XVIII, № 3. С. 66–78.
5. Сорокоумова Я.В., Расторгуев А.В., Курбонов М.Д. Оценка продольной дисперсивности при калибровке моделей тепломассопереноса в грунтовых водах на территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2024. № 4. С. 52–60.
6. Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Российской Федерации в 2021 году. М.: ФГБУ «Гидроспецгеология», 2022. Вып. 45. 120 с.
7. Шенькман Б.М. Гидрогеохимическая и тепловая техногенные аномалии в районе Байкальского целлюлозно-бумажного комбината // География и природные ресурсы. 2016. № 5. С. 239–246.

ГЕОХИМИЯ УГОЛЬНЫХ БАССЕЙНОВ: ОТ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ К НОВЫМ РЕСУРСНЫМ ВОЗМОЖНОСТЯМ

Тарасенко И.А.

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, tarasenko_irina@mail.ru

Аннотация. При затоплении угольных шахт формируются подземные воды с различным химическим составом, контролируемым литологией, pH и геохимией угля. Показано, что кислые воды действуют как эффективный агент выщелачивания, мобилизуя широкий спектр химических элементов. Полученные данные не исключают возможность извлечения стратегически значимых элементов из шахтных вод. Это трансформирует экологическую проблему в ресурсную возможность.

Ключевые слова: угольные бассейны, шахтные воды, металлоносные угли, геохимические процессы

Abstract. The flooding of coal mines leads to the formation of underground waters with diverse chemical compositions, controlled by lithology, pH, and coal geochemistry. It is shown that acidic waters act as effective leaching agents, mobilizing a wide range of elements. The results suggest the potential for extracting strategically important elements from mine waters, turning an environmental problem into a resource opportunity.

Keywords: coal basins, mine waters, metalliferous coals, geochemical processes

Уголь – один из важнейших энергетических ресурсов, его мировая добыча превышает 8 млрд т. в год, что больше, чем добыча любого другого твердого полезного ископаемого. Россия занимает лидирующие позиции по запасам угля и активно наращивает его добычу, особенно на Дальнем Востоке и в Арктике [1]. Реализуются масштабные проекты по созданию новых и расширению действующих угледобывающих предприятий. При этом освоение месторождений сопровождается серьезными экологическими проблемами. Особую опасность представляет ликвидация шахт методом затопления, вызывающая значительные изменения гидрогеологической обстановки. Угольные бассейны становятся не только энергетическим ресурсом, но и ареной активной геохимической трансформации элементов при техногенном воздействии.

Реструктуризация угольной отрасли в 1990-х годах наглядно продемонстрировала масштаб этих экологических последствий. В результате закрытия шахт трансформировался гидродинамический режим подземных вод, повысился уровень грунтовых вод, наблюдается подтопление земной поверхности, разгрузка вод техногенного комплекса, деформация зданий и сооружений, оседание и провалы земной поверхности. В регионах возрастает воздействие на бассейн подземных вод и, как следствие, на основные источники нецентрализованного водоснабжения, а также на поверхностные водотоки, часто имеющие рыбохозяйственное значение. Особого внимания заслуживает и состав самого угля. Огромные запасы угля сегодня все еще недостаточно оценены в аспекте содержания попутных ценных элементов и потенциально опасных примесей. В результате мы сталкиваемся с тем, что нередко такие угли используются в теплоэнергетике, сжигаются, нанося вред окружающей среде и здоровью населения. В то же время они могут служить источником стратегически важных элементов, необходимых для высокотехнологичных отраслей промышленности. Если содержание металла в угле превышает 5-кратное значение кларка, то такой уголь считается обогащенным и позволяет отнести его к категории металлоносного, поэтому при создании и реализации масштабных проектов угольной отрасли важно задаваться вопросом: подземные (шахтные) воды и металлоносные угли – это вызов обществу в виде нового загрязнения территорий или возможность получения ценных элементов? Подземные воды и металлоносные угли являются компонентами единой геохимической системы угольного бассейна, где происходят процессы накопления, миграции и трансформации элементов. Понимание закономерностей этих процессов лежит в основе данного исследования. Таким образом, возникает выбор – рассматривать шахтные воды и металлоносные угли как источник загрязнения или как технологически управляемый резерв стратегических ресурсов.

Рассмотрены геохимические особенности и закономерности формирования состава подземных вод в районах ликвидированных шахт Приморья, Сахалина, а также Донецкого, Кизеловского, Кузнецкого, Печорского и Челябинского бассейнов. Эти бассейны сформировались в различных геологических условиях. Горные породы (и, соответственно, геологические формации), слагающие рассматриваемые бассейны, представляют собой континентальные, морские, прибрежно-морские осадочные и вулканогенно-осадочные, в различной степени литифицированные отложения, выполняющие депрессии.

В разных угольных бассейнах формируются воды с разным химическим составом. Геохимическая специфика подземных вод закладывается в области питания и трансформируется в направлении фильтрационного потока. Миграция химических компонентов осуществляется преимущественно в виде незакомплексованных ионов. С увеличением минерализации доля комплексных соединений миграционных форм растет. Все рассматриваемые воды неравновесны с первичными породами, но насыщены по отношению к вторичным минералам. Именно вторичные минералы и контролируют содержания химических элементов в водах.

Показано, что состав вод зависит от состава пород осадочных бассейнов и, в первую очередь, от наличия в угольных и надугольных толщах морских, соленосных и пресноводных групп геологических формаций [2, 13]. В бассейнах, сложенных преимущественно пресноводными отложениями, формируются слабосоленоватые, гидрокарбонатные натриевые воды. Такой тип вод отмечается в Кузнецком бассейне, а также в угольных бассейнах Приморья и Сахалина [2, 13]. Наибольший экологический риск представляют воды, формирующиеся в регионах с чередующимися морскими, соленосными и пресноводными фациями. К таким относятся Донецкий, Челябинский, Печорский угольные бассейны, а также Кизеловский бассейн, где формируются сульфатные железистые воды с высокой минерализацией и низким значением pH. Эти воды сходны с классическим дренажом кислых вод. Кислая среда значительно повышает растворимость большинства первичных минералов в породах. В результате практически весь спектр элементов мобилизуется в воду. Расчет коэффициентов миграционной подвижности показывает, что для кислых вод отношение концентрации элемента в воде к его кларку (C_w/C_c) $\gg 1$, тогда как в нейтральных водах те же элементы имеют $C_w/C_c \sim 0.01-2$ (близко к мировому фону). Иными словами, подвижность металлов в зоне гипергенеза резко возрастает при падении pH. Кислая реакция усиливает выщелачивание минералов и мобилизацию элементов, в том числе редкоземельных, превращая воды в геохимические ловушки или доноры стратегически важных металлов. В результате затопление шахт приводит к формированию локальных гидрогеохимических аномалий с повышенным содержанием ряда компонентов. Набор этих компонентов, их концентрации и формы миграции детерминированы и термодинамически лимитированы. При этом химический состав шахтных вод определяется не только литологией надугольной толщи, но и геохимией самого угля. Благодаря развитию аналитических методов изучение неорганических компонентов угля вышло на новый уровень детализации.

В сотрудничестве с коллегами из других научных учреждений проведены комплексные исследования углей различных месторождений. Установлен набор геохимических аномалий (Ge, Sb, Hg, W, Li, Be, Cs, As, U, Mo, Y, Rb, Zn, Ga и др.) в углях Дальнего Востока России и Китая, обусловленных составом вмещающих пород, субсинхронным вулканизмом и эпигенетическими процессами [3–5, 8, 11, 14 и др.]. В углях месторождений Приморского края выявлены промышленные концентрации германия, редкоземельных элементов, скандия, лития и других стратегически значимых элементов [10]. Изотопно-геохимические исследования показали, что источником редкоземельных элементов в бассейнах южного Приморья были верхнекоровые породы, подвергшиеся выветриванию [7, 9]. Обогащение углей здесь осуществлялось двумя главными путями: кластогенно (с обломочным материалом) и гидрогенно (с инфильтрационными водами). В результате многие угольные пласты месторождений содержат повышенные количества

редких и рассеянных элементов, как ценных (например, РЗЭ, Ge и др.), так и токсичных (Hg, As, Be и др.). При окислении и выщелачивании (в том числе при затоплении шахт) из угля высвобождается значительное количество ранее накопленных элементов. Образующиеся при этом растворы можно рассматривать, с одной стороны, как потенциальный источник ценных элементов для извлечения, а с другой – как источник загрязнения окружающей среды при бесконтрольном сбросе. Известны примеры [6, 12] успешного внедрения технологий по выделению Ge и РЗЭ из шахтных вод, углей и золошлаковых отходов (Германия, США, Китай). Таким образом, проанализированы оригинальные данные по миграции элементов в шахтных водах, а также обобщены опубликованные данные по геохимии металлоносных углей. Полученные результаты расширяют представления об особенностях и закономерностях формирования и локализации геохимических аномалий в угольных бассейнах (в подземных водах и углях). Установленные закономерности важны для разработки методов прогнозирования металлоносности, гидрогеохимических прогнозов, мероприятий по управлению качеством подземных вод, а также технологий попутного извлечения ценных компонентов и комплексного использования минерального сырья.

Список литературы

1. Арбузов С.И., Чекрызов И.Ю., Тарасенко И.А. Редкометалльный потенциал углей Сибири и Дальнего Востока России и перспективы его освоения // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук, 2023. № 5. С. 31–51. DOI: 10.37102/0869-7698_2023_231_05_3.
2. Тарасенко И.А. Геохимические особенности состава и закономерности формирования подземных вод в природно-техногенных гидрогеологических структурах районов ликвидированных угольных шахт. М.: ГЕОС, 2018. 247 с.
3. Чекрызов И.Ю., Тарасенко И.А., Арбузов С.И., Попов Н.Ю. Ресурсы и добыча германия на Дальнем Востоке России: современное состояние, проблемы и перспективы // Вестник Дальневосточного отделения РАН. 2025. № 5. С. 41–52.
4. Arbuzov S.I., Chekryzhov I. Yu., Spears A., Ilenok S. S., Soktoev B. R., Popov N. Yu. Geology, geochemistry, mineralogy and genesis of the Spetsugli high-germanium coal deposit in the Pavlovsk coalfield, Russian Far East // Ore Geology Reviews. 2021. 139(5):104537.
5. Arbuzov S.I., Spears D.A., Ilenok S.S., Chekryzhov I.Y., Ivanov V.P. Modes of occurrence of germanium and tungsten in the Spetsugli germanium ore field, Pavlovka brown coal deposit, Russian Far East // Ore Geology Reviews. 2021. Vol. 132, Article number 103986.
6. Dai Sh., Finkelman R.B., Hower J.C., French D., Graham I.T., Zhao L. Inorganic Geochemistry of Coal. 2023. 450 p.
7. Nechaev V.P., Dai Sh., Bechtel A., Chekryzhov I.Yu., Pavlyutkin B.I., Vysotskiy S.V., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Guo W., Tarasenko I.A., Nechaeva E.V., French D., Hower J. Bio-geochemical evolution and critical element mineralization in the Cretaceous-Cenozoic coals from the southern Far East Russia and northeastern China // Applied Geochemistry. 2020. Vol. 117. Article ID 104602. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104602>.
8. Nechaev V.P., Dai Sh., Chekryzhov I.Yu., Tarasenko I.A., Zin'kov A.V., Moore T.A. Origin of the tuff parting and associated enrichments of Zr, REY, redox-sensitive and other elements in the Early Miocene coal of the Siniy Utyes Basin, southwestern Primorye, Russia // International Journal of Coal Geology. 2022. Vol. 250, N1. 103913.
9. Nechaev V.P., Chekryzhov I.Yu., Vysotskiy S.V., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Tarasenko I.A., Agoshkov A.I. Isotopic signatures of REY mineralization associated with lignite basins in South Primorye, Russian Far East // Ore Geology Reviews. 2018. Vol. 103. P. 68–77.
10. Popov N.Y., Chekryzhov I.Y., Tarasenko I.A., Kasatkin S.A., Kholodov A.S. Structural and geochemical features of coal-bearing sediments and sources of rare element impurities in coals of the Rakovka depression (Primorsky krai, Russia) // International Journal of Coal Science and Technology. 2022. Vol. 9, N 14.
11. Shen M., Dai Sh., Nechaev V., Graham I., Hower J.C., Liu Sh., Tarasenko I., Zin'kov A., Chekryzhov I., Antonchenko V., Zhang Sh. Mineralogy and geochemistry of altered Emeishan basaltic volcanoclastics with respect to their critical element mineralization // Journal of Geochemical Exploration. 2024. Vol. 264. 107527.
12. Stewart, B.W., Capo, R.C., Hedin, B.C., Hedin, R.S., 2017. Rare earth element resources in coal mine drainage and treatment precipitates in the Appalachian Basin, USA // Int. Journal. Coal Geol. 169, 28e39.
13. Tarasenko I.A., Kholodov A.S., Zin'kov A.V., Chekryzhov I.Y. Chemical composition of groundwater in abandoned coal mines: evidence of hydrogeochemical evolution // Applied Geochemistry. 2022. Vol. 137. 105210.
14. Wang N., Dai Sh., Nechaev V.P., French D., Graham I.T., Song X., Chekryzhov I.Yu., Tarasenko I.A., Budnitskiy S.Y. Detrital U-Pb zircon geochronology, zircon Lu-Hf and Sr-Nd isotopic signatures of the Lopingian volcanic-ash-derived Nb-Zr-REY-Ga mineralized horizons from eastern Yunnan, SW China // Lithos. 2024. P. 468–469. 107494. DOI:10.1016/j.lithos.2024.107494.

THE INFLUENCE OF RAINFALL INTENSITY ON THE MIGRATION PROCESSES OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS WITH DIFFERENT FORMS IN THE VADOSE ZONE

Chen C.C.¹, Zhu P.K.^{1,2}, Liu Y.L.³, Liu F.¹, Du J.Q.²

¹MOE Key Laboratory of Groundwater Circulation and Environmental Evolution, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, China

²Beijing Yanshan Earth Key Belt National Field Scientific Observation and Research Station, Beijing, China

³School of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing, China
chencuibai@cugb.edu.cn

Аннотация. Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) – стойкие токсичные загрязнители. В данном исследовании с использованием образцов почвы Пекинской станции критической зоны Яньшань проведен количественный анализ ПАУ в окружающей среде, а также изучено влияние интенсивности осадков на перенос ПАУ с помощью экспериментов по выщелачиванию в почвенных колонках в лабораторных условиях. Как в грунтовых водах, так и в почвенном профиле преобладают низкомолекулярные ПАУ, при этом содержание общего органического углерода и влажность почвы положительно коррелируют с их концентрациями. При интенсивности осадков ≥ 20 мм/ч усиливается коллоидный перенос высокомолекулярных ПАУ, а при ≥ 40 мм/ч доминирующий механизм переноса ПАУ смещается из непрерывной фазы в дисперсную и сопровождается увеличением их концентраций, что требует усиленного мониторинга подземных вод для обеспечения безопасности питьевого водоснабжения.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды, интенсивность осадков, коллоидный перенос, мониторинг грунтовых вод

Abstract. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) are persistent toxic pollutants. Using soil from Beijing Yanshan Critical Zone Station, this study quantitatively analyzed PAHs in environmental media and explored rainfall intensity's impact via indoor soil column experiments. Low-ring PAHs dominated, with TOC and moisture positively correlated with PAHs. When rainfall ≥ 20 mm/h, high-ring PAHs' colloidal transport was enhanced; at ≥ 40 mm/h, PAHs' dominant transport shifted to colloidal phase, requiring strengthened groundwater monitoring to ensure drinking safety.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons, rainfall intensity, colloidal transport, groundwater monitoring

Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs), as a category of Persistent Organic Pollutants (POPs), are regarded as one of the most polluting chemical substances in the environment, are persistent, highly toxic, and strongly hydrophobic organic pollutants that are widely present in the environment [1]. They can migrate into deeper soil layers under rainfall leaching [2]. Against the backdrop of global changes in precipitation patterns, studying the migration rules of PAHs in soil is of great significance for protecting regional ecology and the safety of human settlements. In this study, soil from the National Field Observation and Research Station in the Beijing Yanshan Critical Zone was selected as the research object. The concentrations and compositional characteristics of PAHs in environmental media were quantitatively analyzed, and the impact of rainfall intensity on PAH migration in soil was investigated through indoor soil column leaching experiments. The results revealed four key findings:

The spatiotemporal variations of PAHs in groundwater were divided into three distinct phases. During the winter snow period, most PAHs in different forms reached their respective peak concentrations. In the spring snowmelt phase, the concentrations of dissolved and colloidal PAHs showed an increasing trend, while the summer rainfall phase had the highest number of PAH monomers exceeding regulatory limits. PAH levels in rainfall samples increased with increasing rainfall intensity, and during the flood season, precipitation induced further variations in groundwater PAH content.

The average concentrations of dissolved, colloidal, and particulate Σ PAHs in groundwater were 90.83, 632.75, and 1218.89 ng/L, respectively. Seven dissolved monomers-including naphthalene, phenanthrene, fluoranthene, benz [a] anthracene, chrysene, benzo [g,h,i] perylene, and indeno [1,2,3-cd] pyrene-exceeded the water quality standards. The average Σ PAH concentration in

the soil profile was 40.51 ng/g, which remained below the pollution threshold. Both groundwater and soil profiles were dominated by low-ring (2~3 rings) PAHs, with naphthalene being the most prevalent. The presence of high-ring PAHs in deep groundwater and soil layers was attributed to colloidal and particulate-facilitated transport.

The main internal factors affecting the distribution of PAHs in soil included TOC content, soil pH, moisture, and porosity. TOC and moisture were significantly positively correlated with PAH levels ($P < 0.05$), while soil pH showed a significant negative correlation. Porosity only exhibited a negative trend. Rainfall intensity was identified as the key external driver of PAH migration. PAH concentrations in the soil profile decreased with depth, with significantly higher levels in the 0-30 cm layer than in the 30-80 cm layer. Monomers such as naphthalene, acenaphthene, fluorene, pyrene, benzo[a]pyrene, and benzo [g,h,i] perylene had higher relative abundances in deeper soil layers, indicating stronger migration potential.

Soil column leaching experiments under different rainfall intensities showed that when the rainfall intensity increased to 40 mm/h, the dominant transport mechanism of PAHs in soil gradually shifted from the dissolved phase to the colloidal phase, accompanied by an increase in the concentrations of medium (4 rings) and high (5~6 rings) molecular-weight PAHs [3]. The threshold rainfall intensity for enhanced transport of high-molecular-weight (5~6 rings) PAHs was determined to be 20 mm/h, with colloidal association serving as the primary migration pathway. Notably, benzo [a] pyrene and benzo [g,h,i] perylene exhibited the most significant mobility. Therefore, when heavy rainfall events exceed 20 mm/h, enhanced monitoring of groundwater quality should be carried out, along with necessary preventive measures, to ensure drinking water safety.

References

1. Peng J., Chen Y., Xia Q., Rong G., Zhang J. Ecological risk and early warning of soil compound pollutants (HMs, PAHs, PCBs and OCPs) in an industrial city, Changchun, China // *Environmental Pollution*. 2021. 272(1): 116038. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118134.
2. Enell A., Reichenberg F., Warfvinge P., Ewald G. A column method for determination of leaching of polycyclic aromatic hydrocarbons from aged contaminated soil // *Chemosphere*. 2004. 54(6). P. 707–715. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2003.08.026.
3. Chen C., Zhu P., Zhang N., Liu Y., Wang S., An Z., Liu F., Du J. Impact of rainfall intensity on the leaching process of different forms of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil // *Acta Science Circumstantiae*. 2025. 45(9). P. 391–400. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2025.0127.

FROM EXPANSION TO RECOVERY: GROUNDWATER DEPRESSION CONES IN THE NORTH CHINA PLAIN

Yu J.J.¹, Wang L.F.², Wang P.¹, Liu C.M.¹

¹*Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China.*

²*Institute of Geo-Environmental Monitoring, Beijing, China, yujj@igsnrr.ac.cn*

Аннотация. Северо-Китайская равнина – регион Китая с наименьшими запасами водных ресурсов на душу населения и наивысшей интенсивностью их освоения. С начала 1970-х годов подземные воды стали основным источником водоснабжения для промышленности и сельского хозяйства. Непрерывная чрезмерная эксплуатация подземных вод в течение более 50 лет привела к формированию крупнейшего в мире конуса депрессии уровня грунтовых вод, что вызвало ряд экологических проблем и угрожает устойчивому развитию региона. В статье представлен краткий обзор эволюции основных типичных конусов депрессии мелководных и глубоких грунтовых вод, их причин, а также мер по регулированию чрезмерной эксплуатации подземных вод и их эффективности на Северо-Китайской равнине. Ожидается, что опыт и уроки освоения и использования подземных вод на Северо-Китайской равнине Китая послужат ориентиром для управления устойчивым развитием в регионах с дефицитом водных ресурсов.

Ключевые слова: *чрезмерная эксплуатация подземных вод, конус депрессии грунтовых вод, динамика эволюции, эффективность управления*

Abstract. The North China Plain is the area with the least per capita water resources and the highest intensity of water resources development in China. Since the early 1970s, groundwater has become the main source of industrial and agricultural water supply. The continuous overexploitation of groundwater for over 50 years has formed the world's largest depression cone of groundwater water level decline, causing a series of ecological issues and threatening regional sustainable development. This paper provide a briefly review on the evolution of the main typical shallow and deep groundwater depression cones and the causes, the measures and effects of groundwater overexploitation governance in the North China Plain. It is expected that the experience and lessons of groundwater development and utilization in the North China Plain of China will provide reference for regional sustainable development management in water shortage regions.

Keywords: *groundwater overexploitation, groundwater depression cone, evolution dynamic, governance effectiveness*

The North China Plain has a semi humid and semi-arid climate in the warm temperate zone. The average annual precipitation is 400–800 mm, and the per capita water resources are only 300m³/year [5]. Since the 1970s, with the population growth and rapid development of industry and agriculture, the proportion of groundwater supply has increased, accounting for more than 75 % of the total water supply. In the concentrated groundwater exploitation area, the groundwater withdrawal continues to exceed the recharge, leading to the formation and rapid development of shallow and deep groundwater depression, which has become a prominent problem restricting regional ecological security and sustainable development. In view of the problem of groundwater depression cone in the North China Plain, a lot of researches have been carried by scientists and a series of comprehensive measures have been taken to control groundwater overexploitation by the national and local governments. Based on annual reports official monitoring and research literature, this paper provides a brief review of the development of typical groundwater depression cones in North China, the driving forces behind these changes, and the measures and effects of governance.

The piedmont plain area in North China (piedmont alluvial zone in Taihang Mountain and Yanshan Mountains) is the main distribution area of shallow groundwater. Overexploitation has led to a series of shallow groundwater depression cones distributed in the piedmont plain, with the most representative being the Beijing cone, Shijiazhuang cone, Gaoliqing cone, Baoding cone, Handan cone, and Ningbailong cone [6, 7, 16, 17]. In the middle east of the alluvial plain of the North China Plain and the coastal area, the shallow groundwater is mostly saline water, and the deep underground fresh water below the saline water is the main water supply source in this area. Overexploitation has formed multiple relatively independent deep groundwater depression cones, mainly including the Jizaoheng cone, Cangzhou cone, Ninghe Tanghai cone, Bazhou cone, Qingxian cone, Langfang cone, and Dezhou cone, which have been continuously developed [1, 10,

11, 12, 13]. The evolution of groundwater depression cones in the North China Plain can be divided into a rapid development stage (1970s-2014) and a steady recovery stage (2014-2025). The evolution characteristics of the conical groundwater depth and area of 6 typical shallow groundwater depression cones are shown in Table 1. In the rapid development stage, all shallow cones showed characteristics of a sharp increase in central groundwater depth and a substantial expansion in area. Among them, the central groundwater depth of the Beijing cone was 6.3 meters with an area of 420 km² in 1970, increased to 34.7 m with an area of 1860 km² in 1990, and reached a peak in 2014 with a depth of 93.0 m and an area of 4150 km² [3]. Over 44 years, the depth increased by a total of 86.7 m and the area expanded by 3730 km². During the same period, the central groundwater depth of the Shijiazhuang cone increased from 5.2 m to 93.0 m, and the area expanded from 380 km² to 4020 km², with a cumulative level reduction of 87.8 m [6, 17]. After 2014, the cones entered a recovery stage. The shallow Gaoliqing cone showed the most significant recovery effect: the central groundwater depth rose from 95.0 m to 85.3 m, with a rise of 9.7 m, and the area reduced from 3980 km² to 3650 km², a reduction of 330 km² [7, 17]. The Beijing and Shijiazhuang cones also achieved a steady rise in depth and a continuous reduction in area, showing an overall benign evolution trend.

The evolution trend of deep groundwater depression cones in the North China Plain is consistent with that of shallow ones, but with a greater overall depth and a faster expansion rate. The evolution characteristics of 7 typical deep groundwater depression cones are shown in Table. The depression cone developed rapidly from the 1970s to 2014. The central groundwater depth of the Cangzhou cone was 32.65 m with an area of 750 km² in 1973 [11], reaching 110.0 m with an area of 3980 km² in 2014 [11, 18]. Over 41 years, the cumulative water level dropdown was 77.35 m and the depression cone area expanded by 3230 km² [11, 18]. The central groundwater depth of the Jizaoheng cone increased from 26.8 meters to 108.0 m and the area expanded from 820 km² to 4320 km² from 1975 to 2014 [11, 18], making it the region with the most significant area expansion among deep cones. From 2014 to 2025, deep cones have fully entered a recovery stage. The Jizaoheng cone had the largest rise: the central groundwater depth rose from 108.0 m to 96.8 m (a rise of 11.2 m), and the cone area reduced from 4320 km² to 3870 km² (a reduction of 450 km²) [18, 19]. The Ninghetanghai cone had a depth rise of 11.3 m and an area reduction of 430 km² [6]. Deep cones such as Cangzhou, Bazhou, and Qingxian have all achieved a benign evolution of rising depth and reducing area [1, 13, 18].

The formation and development of groundwater depression cones are the result of the combined effects of natural endowment constraints and human activity drivers. From a natural perspective, the North China Plain has uneven temporal and spatial distribution of precipitation and a shortage of surface water resources, making groundwater a rigid water supply choice. Moreover, the limited recharge capacity of regional aquifers makes it difficult to support long-term high-intensity exploitation. From a human activity perspective, the over-exploitation of agricultural water caused by irrigation, the surge in industrial water demand triggered by rapid industrial development, and the growth in domestic water demand during the urbanization process have formed a pattern of long-term groundwater over-exploitation. Meanwhile, the combined exploitation of shallow and deep groundwater has further exacerbated the development and contiguousness of cones. In addition, the regional topography, geomorphology, and aquifer lithological characteristics have also made the water level recovery and cone shrinkage after groundwater over-exploitation more resistant.

Since 2014, a series of governance measures have been fully implemented, including supplementing ecological water use through the South to North Water Diversion Project, using external water instead of local groundwater withdrawal, implementing water saving agricultural and managing industrial water quota, and designating groundwater restricted areas. Consequently, the withdrawal of groundwater has been greatly reduced, the groundwater recharge capacity has gradually recovered, and the water level of shallow and deep groundwater depression started to rise [11, 19, 20].

Shallow and deep groundwater depression cones development from 1970 to 2025

Shallow Cone Name	Time Node	Depth to Conical Ground water, m	Cone Area, km ²	Ref .No.	Deep Cone Name	Time Node	Depth to Conical Groundwater, m	Cone Area, km ²	Ref .No.
Beijing	1970	6.3	420	[12]	Jizaoheng	1975	26.8		[5]
	1990	34.7	1860	[12]		1990	50.3		[5]
	2014	93	4150	[12]		2014	108.0	4320	[5]
	2020	88.6		[20]		2020	103.6		[5]
	2025	84.1*		[20]		2025	98.9*	3870	[5]
Shijiazhuang	1970	5.2	380	[2]	Cangzhou	1973	32.65		[3]
	1990	30.2		[2]		1990	68.5		[3]
	2014	93.0	4020	[2]		2014	110.0		[3]
	2020	89.3		[10]		2020	107.8		[8]
	2025	85.1*		[10]		2025	102.35*		[20]
Gaoliqing	1975	4.8		[13]	Ninghetanghai	1978	24.5		[15]
	1990	29.5	3980	[13]		1990	48.2		[15]
	2014	95.0	3650	[13]		2014	108.0		[15]
	2020	90.2		[13]		2020	103.5		[15]
	2025	85.3*		[13]		2025	98.8*		[15]
Baoding	1970	4.5		[1]	Bazhou	1975	22.3		[16]
	1990	28.1		[1]		1990	45.7		[16]
	2014	88.0		[1]		2014	102.0		[16]
	2020	84.7		[9]		2020	98.2		[16]
	2025	80.3*		[9]		2025	93.5*		[16]
Handan	1970	5.1		[14]	Qingxian	1976	25.1		[17]
	1990	31.3		[14]		1990	47.9		[17]
	2014	95.0		[14]		2014	103.0		[17]
	2020	90.5		[14]		2020	99.1		[17]
	2025	85.8*		[14]		2025	94.4*		[17]
Ningbolong	1970	5.0		[8]	Langfang	1975	23.7		[18]
	1990	32.0		[8]		1990	46.9		[18]
	2014	98.5		[8]		2014	104.0		[18]
	2020	93.8		[8]		2020	99.8		[18]
	2025	88.6*		[8]		2025	95.5*		[18]
Note :* the predicted value based on the rebound rate from 2014 to 2023					Dezhou	1970	27.2		[19]
						1990	51.6		[19]
						2014	106.0		[19]
						2020	101.7		[19]
						2025	97.3*		[19]

The practice of harnessing the cone of the groundwater level depression in the North China Plain shows that the ecological restoration of groundwater is a long-term and systematic task that requires adhering to the comprehensive harnessing of internal water-saving, external water supplement, advanced and strict withdrawal control technology and policies. Although the groundwater level has generally risen, the groundwater level in some areas is still very low, and the continuous characteristics of the cone have not fundamentally changed. The balance between groundwater recharge and exploitation still needs to be strengthened in governance.

In the future, it is necessary to further strengthen the rigid constraint of water resources, deepen water conservation in agriculture, industry, and domestic sectors, optimize the allocation of externally transferred water and the pattern of ecological water replenishment, improve the groundwater dynamic monitoring network, build a long-term mechanism for groundwater protection and restoration, promote the fundamental improvement of the groundwater ecological environment in the North China Plain, and provide a solid water resource and ecological security guarantee for the high-quality development of the region.

References

1. Bazhou City Water Bureau. Implementation Plan for Deep Groundwater Treatment in Bazhou City (2021–2025). 2021.
2. Beijing Hydrological Station. Analysis Report on the Trend of Groundwater Recovery in Beijing (2014–2023). 2024.
3. Beijing Municipal Water Affairs Bureau. Annual Report on Groundwater Dynamic Monitoring in Beijing (2023). 2024
4. Dezhou City Water Resources Bureau. Dezhou City Deep Groundwater Overexploitation Control Plan (2021-2030). 2021.
5. Fei, Y., Miao, J., Zhang, Z., et al. Evolution of groundwater depression cones and leading factors in the North China Plain // *Resources Science*. 2009. 31(3): 394–399.
6. Handan Water Resources Bureau. Evaluation Report on the Effectiveness of Groundwater Overexploitation Control in Handan City (2014–2023). 2024.
7. Hebei Institute of Water Resources Science. Research Report on Comprehensive Management of Gaoliqing Groundwater Funnel. 2023.
8. Hebei Provincial Department of Water Resources. Comprehensive Management Report on Overexploitation of Groundwater in Hebei Province (2023). 2024.
9. Hengshui Water Resources Bureau. Evaluation Report on the Effectiveness of Deep Groundwater Treatment in Hengshui City (2014–2023). 2024.
10. Langfang Water Bureau. Report on the Effectiveness of Groundwater Dynamic Monitoring and Treatment in Langfang City (2023) . 2024.
11. Li, W., Wang, L., Yang, H., et al. The groundwater overexploitation status and countermeasure suggestions of the North China Plain // *China Water Resources*. 2020. 13: 26–30+2.
12. Liu C.M., Yu J.J., Eloise K. Groundwater Exploitation and Its Impact on the Environment in the North China Plain // *Water International*. 2001. 26(2): 265-272
13. Qingxian Water Affairs Bureau. Annual Report on Comprehensive Management of Overexploitation of Groundwater in Qingxian County (2023). 2024.
14. Shijiazhuang Water Resources Bureau. Annual Report on Groundwater Dynamic Monitoring in Shijiazhuang City (2023). 2024
15. Tianjin Municipal Water Affairs Bureau. Report on Dynamic Monitoring and Treatment of Groundwater Funnel in NingheTanghai. 2023
16. Wanfang Data. Evolution characteristics and genesis analysis of groundwater depression cone in Ningbailong, Hebei Plain. 2021
17. Yang H.F., Cao W.G., Zhi C.S., et al. Evolution of groundwater level in the North China Plain in the past 40 years and suggestions on its overexploitation treatment. *Geology in China*. 2021. 48(4) P.1142–1155.
18. Yang H.F., Li Z.Y., Meng R.F., et al. Evolution of deep groundwater balance and renewability analysis in the North China Plain under new hydrological conditions // *Hydrogeology & Engineering Geology*. 2025. 52(3). P. 28–42.
19. Zhao Y., Wu C., Liu R., et al. Evolution patterns, protection, and restoration of deep confined aquifer in the North China Plain[J]. *China Water Resources*. 2026. 2:19–28.
20. Zhang G., Fei Y., Liu K., et al. Groundwater potential recovery and water level variation in the Shijiazhuang water-receiving area at the central line of the south-to-north water transfer project, China. *Geological Bulletin of China*. 2007. 26(5): 583–589.

SIMULATING PFAS TRANSPORT IN A VADOSE ZONE USING AN ENSEMBLE KALMAN FILTER WITH A MODIFIED HYDRUS-1D MODEL

Wang Sh.^{1,2}, Tong J.^{1,2}

¹*MOE Key Laboratory of Groundwater Circulation and Environmental Evolution, China University of Geosciences, Beijing, PR China*

²*School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing, PR China*
juxiu.tong@cugb.edu.cn

Аннотация. Пер- и полифторалкильные вещества (PFAS) в подземных средах становятся серьезной экологической проблемой из-за их стойкости, токсичности и повсеместного распространения. Хотя механизмы переноса PFAS еще не до конца изучены, недавние исследования показывают, что адсорбция на границе раздела воздух – вода (AWIA) играет доминирующую роль в удержании PFAS в зоне аэрации, составляя 50–75 % от общего количества удержанных PFAS и превосходя традиционную адсорбцию в твердой фазе. Однако ключевые аспекты этого процесса, в частности фундаментальный коэффициент AWIA K_{aw} , остаются недостаточно изученными, поэтому в исходный код HYDRUS-1D был добавлен оригинальный модуль AWIA для моделирования переноса перфтороктановой кислоты (PFOA) (одно из типичных PFAS) в зоне аэрации. Модель была успешно проверена на экспериментальных данных, полученных в ходе исследований песчаных колонн. Как K_{aw} , так и α_L оказались важными параметрами для переноса PFOA в зоне аэрации. Более высокое значение дисперсности с $\alpha_L = 0.7$ см обеспечивает лучшую производительность модели, чем $\alpha_L = 0.2$ см для L18. α_L существенно влияло на временные характеристики прорыва PFOA, при этом большие значения α_L приводили к увеличению интервалов между начальным и полным прорывом. Была подчеркнута критическая роль α_L в управлении переносом PFOA в условиях ненасыщенной почвы.

Ключевые слова: модель переноса PFOA, коэффициент адсорбции на границе раздела воздух – вода, HYDRUS-1D, кривая прорыва

Abstract. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in subsurface media become a significant environmental concern due to their persistence, toxicity and ubiquitous occurrence. Although the transport mechanisms of PFAS are not yet fully understood, recent studies reveal that air – water interface adsorption (AWIA) plays a dominant role in vadose zone retention, contributing 50–75 % of total PFAS retention and surpassing traditional solid-phase adsorption. However, key aspects of this process, particularly the fundamental AWIA coefficient K_{aw} , remain poorly constrained, therefore an original AWIA module was added to HYDRUS-1D source code to simulate perfluorooctanoic acid (PFOA) (one of the typical PFAS) transport in vadose zones. The model was successfully validated against experimental data from sand column studies. Both K_{aw} and α_L were essential parameters for PFOA transport in the vadose zone. The higher dispersivity value with $\alpha_L = 0.7$ cm provides better model performance than $\alpha_L = 0.2$ cm for the L18. α_L significantly affected the temporal characteristics of PFOA breakthrough, with larger α_L values resulting in longer intervals between initial and complete breakthrough. The critical role of α_L in governing PFOA transport under unsaturated soil conditions was underscored.

Keywords: PFOA transport model, air-water interface adsorption coefficient, HYDRUS-1D, breakthrough curve

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) have been detected in various environments, including firefighting training sites, manufacturing areas and airports (Filipovic et al., 2015). Unlike traditional contaminants, PFAS were specifically designed as surfactants—a unique property that causes them to accumulate at air-water interfaces, where they may persist in vadose zones for extended periods (Guo et al., 2020). This behavior introduces additional complexity to PFAS transport dynamics, primarily due to a distinct process known as air-water interface adsorption (AWIA). The molecular structure of PFAS, featuring a hydrophobic and oleophobic tail coupled with a hydrophilic headgroup (Guo et al., 2020), enables these compounds to adhere to air-water interfaces. For PFAS transport modeling in vadose zones, AWIA has been shown to play a more critical role than solid-phase adsorption (Zeng et al., 2021). Notably, AWIA serves as a major retention mechanism for PFOA (perfluorooctanoic acid, a representative PFAS), accounting for approximately 50–75% of total retention during transport through the vadose zone (Lyu et al., 2018).

Therefore, extensive research has been conducted on the transport processes of PFOA. Lyu et al. (2018, hereafter L18) acquired retardations factor for PFOA and PFOS transport via mathematical model and experimental studies, employing a linear model to describe the AWIA

coefficient K_{aw} as a constant. Le et al. (2021) developed a new framework to simulate the influence of salt on AWIA for PFAS in environmental systems. In contrast, Guo et al. (2020) derived K_{aw} as a function of aqueous concentration, surface tension, and temperature by directly applying the Szyszkowski equation to the Gibbs adsorption equation. Mathematical models for surfactants transport have been widely utilized in the petroleum industry since the 1970s (Pope and Nelson, 1978). However, compared to general surfactants, research on mathematical modeling of PFAS transport in vadose zones remains limited (Guo et al., 2020). Early efforts by Shin et al. (2011, 2012) employed the U.S. EPA Pesticide Root Zone Model (PRZM-3) to simulate PFOA transport in vadose zones, but their approach did not account for AWIA. In contrast, Silva et al. (2020) incorporated AWIA into their simulations using a modified HYDRUS-1D model, validating their results with experimental data from L18. Meanwhile, Guo et al. (2020) developed a comprehensive mathematical framework to describe PFAS release, transport and retention in vadose zones, using the MATLAB Reservoir Simulation Toolbox. Based on this work, Zeng et al. (2021) conducted a sensitivity and uncertainty analysis of long-term PFAS retention and leaching dynamics.

Therefore, an original AWIA module that differs fundamentally from the approach of Silva et al. (2020) was developed, which was integrated with the HYDRUS-1D source code to simulate PFOA transport in vadose zones. This new implementation was validated against experimental data of L18. Significant conclusions regarding the model's performance were drawn finally.

The variably saturated 1D soil water flow is described by Richard's equation (Richards, 1931)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] = 0 \quad (1)$$

where θ is soil water content (-), t is time (h), z is the vertical axis, positive downward, (cm), h is the soil water pressure head (cm), K is the variably saturated soil hydraulic conductivity ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$), which is parameterized as a function of water content θ in V-G model as follows (Mualem, 1976; van Genuchten, 1980):

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^{0.5} \int_0^{S_e} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

where θ_r and θ_s is residual and saturated soil water content (-), respectively, α (cm^{-1}) and n (-) are empirical parameters, and $m = 1 - 1/n$, K_s is the saturated soil hydraulic conductivity ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$), S_e is the effective soil water saturation (-).

Considering AWIA process, the PFAS transport in a vadose zone is described by a 1D convection-diffusion equation (Guo et al., 2020) based on the soil water flow model:

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} + \frac{\partial \rho s}{\partial t} + \frac{\partial A_{aw} \Gamma}{\partial t} + \frac{\partial q C}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D^w \frac{\partial C}{\partial x} \right) = 0 \quad (5)$$

where C is PFAS solute concentration in liquid phase ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), ρ is bulk density of the porous media ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), s is the PFAS solute concentration in solid phase ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), A_{aw} is the area of AWIA ($\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$), Γ is the PFAS solute concentration in AWIA ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$), q is the Darcy flux ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$), $D^w = \alpha_L v + \tau D_0$ is the dispersion coefficient ($\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$), and α_L is the longitudinal dispersivity (cm), $v = q/\theta$ is the interstitial pore water velocity (cm/s), τ is the tortuosity factor for the water phase (-) and can be approximated as $\tau = \theta^{7/3} \cdot \theta_s^{-2}$ (Millington and Quirk, 1961), D_0 is the molecular diffusion coefficient in free water ($\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$). The solid-phase adsorption isotherm relationship between s and C is described by a generalized nonlinear equation (Šimůnek et al., 2018):

$$s = \frac{k_s C^\beta}{1 + \eta C^\beta} \quad (6)$$

where k_s ($\text{cm}^{3\beta} \cdot \text{g}^{-\beta}$), β (-) and η ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) are empirical coefficients.

The A_{aw} and Γ are expressed as follows (Lyu et al., 2018):

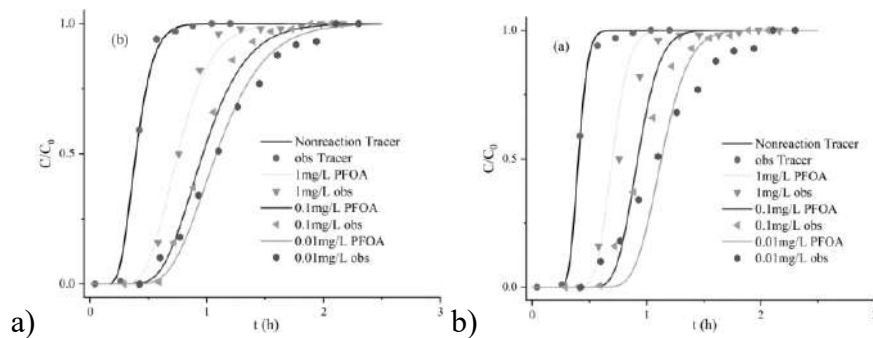
$$A_{aw} = (1 - S_e) A_{max} \quad (7)$$

$$\Gamma = K_{aw} C \quad (8)$$

where A_{max} is the maximum specific AWIA area ($\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$), and its value of 216 (± 17) is determined for 0.35 mm sand in Brusseau et al. (2015).

The prediction model of PFAS transport with an AWIA module different from Silva et al. (2020) was used in this study, which was validated by the experimental results of PFAS transport in Silva et al. (2020). For completeness, we briefly describe the 1D soil column experiments used for validation. In the figure, the experimental setup consisted of a 15 cm long soil column with a 2.0 cm inner diameter, packed with 40/50 mesh natural quartz sand with mean diameter = 0.35 mm (Lyu et al., 2018). Additional experimental conditions are summarized. In the HYDRUS-1D implementation, the soil column was discretized into 100 nodes (0.15 cm spacing) with a simulation time step of 0.001 h over a total duration of 3 h. The upper and lower water boundary conditions were set as both constant fluxes of $13.5 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ via the BTCs simulation for PFOA and non-reactive tracer. And L18, the upper solute transport boundary condition was set as constant concentrations of $C_0 = 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively, and the lower solute transport boundary condition was all set as zero-concentration gradient.

BTC for nonreactive tracer transport in the 1D soil column from L18, where K_s was obtained as $12.2 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$. The simulated BTCs for both the non-reactive tracer and PFOA, using $\alpha_L = 0.2 \text{ cm}$ and 0.7 cm (Lyu et al., 2018; Silva et al., 2020). The simulations employed a constant $K_{aw} = 0.009 \text{ cm}$, which provided optimal agreement between modeled and observed PFOA BTCs. Figure demonstrates that the non-reactive tracer exhibited faster transport through the 1D soil column compared to PFOA, consistent with the absence of AWIA for the tracer. For the $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PFOA solution in Figure (a), the simulated BTC showed good agreement with experimental data up to 0.7 h. However, deviations became apparent at later times, with complete breakthrough occurring at 1.0 h (simulated) versus 1.2 h (observed). The discrepancy between simulated and observed results was more pronounced for lower PFOA concentrations of 0.1 and $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Specifically, simulated and observed total breaking though times were 1.4 h and 1.9 h for $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PFOA in the column. And they were 1.7 h and 2.1 h for $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PFOA, with the initial breakthrough times at 0.7 h and 0.4 h. The simulations with $\alpha_L = 0.2 \text{ cm}$ produced sharper BTCs than observation, with increasing divergence at lower PFOA concentrations ($C_0 = 0.1$ and $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), indicating this dispersivity value inadequately represented actual transport conditions. In contrast, results with $\alpha_L = 0.7 \text{ cm}$ in Figure (b) showed significantly better agreement across all time points and concentrations.



Simulation results with different α_L in L18 and constant $K_{aw} = 0.009 \text{ cm}$: (a) $\alpha_L = 0.2 \text{ cm}$, (b) $\alpha_L = 0.7 \text{ cm}$.

Moreover, to quantitatively assess model performance, the Root mean square error ($RMSE$) and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) for PFOA BTCs simulated with different α_L values were calculated:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i^p/C_0 - C_i^o/C_0)^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i^p - C_i^o)^2 / C_0^2} \quad (14)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (C_i^p/C_0 - C_i^o/C_0)^2}{\sum_{i=1}^n (C_i^p/C_0 - \bar{C}/C_0)^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (C_i^p - C_i^o)^2}{\sum_{i=1}^n (C_i^p - \bar{C})^2} \quad (15)$$

where n is the number of the observation data, C is the PFOA concentration, the superscripts p and o present simulation data and observation data, $C_0 = 1, 0.1$ and $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ for each study case in Figure, $\bar{C}$ is the mean of the simulation values. And the $RMSE$ and NSE for the simulated PFOA BTCs. In the table, the $RMSEs$ with $\alpha_L = 0.2 \text{ cm}$ were all larger than those with $\alpha_L = 0.7 \text{ cm}$, while the $NSEs$ with $\alpha_L = 0.7 \text{ cm}$ were closer to 1 than those with $\alpha_L = 0.2 \text{ cm}$. These results demonstrate that the higher dispersivity value ($\alpha_L = 0.7 \text{ cm}$) provides better model performance for the experimental conditions described in L18.

However, α_L significantly affected the temporal characteristics of PFOA breakthrough, with larger α_L values resulting in longer intervals between initial and complete breakthrough. Notably, the BTC for $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PFOA exhibited smoother breakthrough behavior compared to the 0.1 and $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ solutions, despite using identical α_L values across all simulations. This observation underscores the critical role of α_L in governing PFOA transport under unsaturated soil conditions. These findings align with Zeng et al. (2021), who reported $\alpha_L = 0.35 \text{ cm}$ for similar experimental conditions and identified it as an important parameter for PFOA transport modeling.

In this study, an original AWIA module was compiled and coupled with HYDRUS-1D source code to simulate PFOA transport in the vadose zone. The model was successfully validated using experimental data from L18. Both K_{aw} and α_L were essential parameters for PFOA transport in the vadose zone. The higher dispersivity value with $\alpha_L = 0.7 \text{ cm}$ provides better model performance than $\alpha_L = 0.2 \text{ cm}$ for the L18. α_L significantly affected the temporal characteristics of PFOA breakthrough, with larger α_L values resulting in longer intervals between initial and complete breakthrough. The critical role of α_L in governing PFOA transport under unsaturated soil conditions was underscored. For future research, more complex AWIA models should be explored, incorporating additional parameters such as maximum activity (Γ_{max}) and ion-pairing degree for interfacial adsorption (α , Le et al., 2021), to further refine PFOA transport predictions.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2023YFC3706800).

Reference

1. Filipovic M., Woldegiorgis A., Norström K., Bibi M., Lindberg M., Österås A-H. Historical usage of aqueous film forming foam: a case study of the widespread distribution of perfluoroalkyl acids from a military airport to groundwater, lakes, soils and fish // *Chemosphere*. 2015. 129: 39–45.
2. Guo B., Zeng J., Brusseau ML.. A mathematical model for the release, transport, and retention of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the vadose zone // *Water Resources Research*. 2020. 56(2): e2019WR026667.
3. Le S, Gao Y, Kibbey TCG, Glamore WC, O'Carroll DM. A new framework for modeling the effect of salt on interfacial adsorption of PFAS in environmental systems // *Science of the Total Environment*. 2021. 796: 148893.
4. Lyu Y., Brusseau ML., Chen W., Yan N., Fu X., Lin X.. Adsorption of PFOA at the Air-Water Interface during Transport in Unsaturated Porous Media // *Environmental Science & Technology*. 2018. 52(14): 7745–7753.
5. Pope G.A., Nelson R.C. A chemical flooding compositional simulator // *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1978. 18(05): 339–354.
6. Shin H-M, Ryan PB, Vieira VM, Bartell SM. Modeling the air–soil transport pathway of perfluorooctanoic acid in the mid-Ohio Valley using linked air dispersion and vadose zone models // *Atmospheric Environment*, 2012, 51: 67–74.
7. Shin H-M., Vieira VM., Ryan PB., Detwiler R., Sanders B., Steenland K., Bartell SM.. Environmental fate and transport modeling for perfluorooctanoic acid emitted from the Washington Works Facility in West Virginia // *Environmental Science & Technology*. 2011. 45(4): 1435–1442.
8. Silva JAK, Šimůnek J, McCray JE. A modified HYDRUS model for simulating PFAS transport in the vadose zone // *Water*. 2020. 12(10): 2758.
9. Zeng J., Brusseau ML., Guo B. Model validation and analyses of parameter sensitivity and uncertainty for modeling long-term retention and leaching of PFAS in the vadose zone // *Journal of Hydrology*. 2021. 603: 12717.

VI. МИНЕРАЛЬНЫЕ, ТЕРМАЛЬНЫЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ

ТАРЫССКИЕ ИСТОЧНИКИ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД (РЕСПУБЛИКА ТЫВА): СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Бадминов П.С.¹, Аракчаа К.Д.², Оргильянов А.И.¹, Ескин А.Ю.¹, Шагун А.Н.¹,
Крюкова И.Г.¹

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, *prokop_sbado@mail.ru*

²Тувинское отделение Русского географического общества, Кызыл, *chodura@yandex.ru*

Аннотация. Тарыссские источники термальных вод (Республика Тыва), несмотря на труднодоступность, издавна используются местным населением. Они связаны с различными традициями и культурными особенностями региона и носят местное название «аржааны». Хотя они не являются перспективными для курортного использования, возникла необходимость оценки запасов термальных вод и возможности создания зон санитарной охраны для предотвращения негативного воздействия горнодобывающей промышленности.

Ключевые слова: термальные источники, дебит, запасы гидротерм, химический состав

Abstract. Despite their inaccessibility, the Taris thermal springs (Tuva Republic) have long been used by the local population. They are associated with various traditions and cultural characteristics of the region and are known locally as "arzhaans." Although they are not considered promising for resort use, the need has arisen to assess the thermal water reserves and the possibility of creating sanitary protection zones to prevent the negative impact of mining.

Keywords: thermal springs, flow rate, hydrothermal reserves, chemical composition

Тарыссские источники представляют собой групповой выход азотных термальных вод с температурой от 16 до 48 °С, расположенный в высокогорной местности на юго-востоке Республики Тыва вблизи границы с Монголией. Первые сведения о Тарыссских горячих источниках появились в работах В.М. Левченко в 1935 г. [6]. Изучением химического состава минеральных вод занимались сотрудники «Союзгеокаптажминвод» в 1954–1955 гг. К.Ф. Богородицкий, В.И. Валединский [1], а также конторы «Геоминвод» в 1966 г. В.Н. Фомичева [8]. В 1966 г. вышла монография Е.В. Пиннекера «Минеральные воды Тувы» [7], в которой он также рассмотрел химический состав термальных вод и определил дебит источников. Далее, после большого перерыва, в 2012–2025 гг. исследования были возобновлены Научно-исследовательским институтом медико-социальных проблем и управления Республики Тыва, Тувинским институтом комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (ТИКОПР СО РАН), Тувинским республиканским отделением Русского географического общества и Институтом земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН).

Эти исследования являются актуальными и по сей день, так как источники в летний период активно используются местным населением для лечения от различных заболеваний. В 2020 г. Томским научно-исследовательским институтом курортологии и физиотерапии было выдано Заключение о составе, качестве и бальнеологической ценности воды источника Тарыс. В соответствии с критериями оценки минеральных вод, установленными Минздравом РФ, вода источника является природной минеральной кремнистой термальной лечебной водой для наружного применения и может быть отнесена к четвертой группе бальнеологических вод (подгруппа 4.2, уш-бельдирский тип).

Несмотря на наличие Тарыссских источников термальных вод в бассейне р. Ихэ-Тайрисин-Гол, в 2021–2022 гг. были выданы лицензии на геологическое изучение недр, включающее поиски и оценку месторождений полезных ископаемых. В связи с этим возникла необходимость оценки запасов минеральных вод и возможности создания зон и округов санитарной (горно-санитарной) охраны источников с целью предотвращения

негативного влияния добычи полезных ископаемых. Однако ввиду труднодоступности и отдаленности, расположения в горной местности все предшествующие исследователи признавали бесперспективность Тарыских источников для курортного использования, поэтому единственным экономически оправданным методом оценки запасов минеральных вод будет являться метод оценки по минимальному дебиту родников, установленному единичными замерами. Немаловажно то, что в процессе эксплуатации термальных вод не проводится их отбор, так как все ванны находятся в углублениях, выдолбленных в коренных породах, и имеют проточный характер.

Для решения поставленных задач использовался ряд методов: для оценки запасов минеральных вод – гидрометрический метод; для изучения геологического разреза и выявления разломных зон – метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ); для определения активности разломов и глубины их залегания – микросейсмический метод. Также определялся химический состав как термальных вод, так и холодных поверхностных вод в реках Ихэ-Тайрисин-Гол, Бора-Холь, Аржанец и родниках. Схема расположения гидрометрических створов для замеров расходов воды, положения геофизических и микросейсмического профилей приведена на рисунке.

Замеры расходов воды в реке и источниках производились гидрометрической вертушкой ГР-21, при невозможности замера вертушкой – объемным способом. Для взаимного контроля гидрометрические створы располагались выше и ниже источников.

При выполнении геофизических работ методом ВЭЗ с заземленными рабочими линиями была использована аппаратура «Электротест-RB» (НТК «Диоген», Россия). Ориентировка профилей выбиралась перпендикулярно направлению возможных зон повышенной трещиноватости (разломов). Расстояние между пикетами измерений по профилю составило 25 м и менее. В результате проведенной серии измерений были построены кривые ВЭЗ. Анализ разрезов кажущихся сопротивлений совместно с интерпретацией кривых ВЭЗ и построением геоэлектрических разрезов представляет собой окончательный результат работ методом ВЭЗ [4]. Геоэлектрический разрез, полученный методом электроразведки, корректировался с учетом сведений о геологических образованиях (тектонических зонах, областях измененных пород и др.). Метод микросейсмического зондирования базируется на использовании естественных микросейсм Земли в качестве зондирующего сигнала и основан на инверсии амплитудного-частотного пространственного распределения микросейсмического поля [3]. Для проведения измерений применялся комплект аппаратуры, состоящий из регистраторов «Байкал 7HR» и сейсмометров СК-1П и А1638.

Гидрохимические исследования включали анализ химического и газового состава природных вод. Определение макрокомпонентов в воде проводилось традиционными методами в лаборатории гидрогеологии ИЗК СО РАН, микроэлементов – в Аналитическом центре Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск) методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе ELEMENT-2 (Finnigan MAT, Германия). Газовый состав определялся хроматографическим методом на приборе «Хромас ГК-1000» в ПГК «Сибгеоком», гелий определялся на приборе «Ингем-1». Анализ изотопного состава кислорода и водорода ($\delta^{18}\text{O}$, δD) выполнен в ЦКП «Многоэлементные и изотопные исследования» Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск) с использованием прибора Isotope Ratio Mass-Spectrometer Mat 253.

Тарыские гидротермы относятся к источникам невулканических областей. Атмосферные воды, попадающие с осадками или циркулирующие под землей, нагреваются только за счет контакта с нагретыми породами вдоль разломов, где разрушенные скальные пласты обеспечивают легкие пути для циркуляции воды на большую глубину. Такой механизм формирования характерен для многих источников Байкальской рифтовой зоны, исключая ее фланги, где развита молодая вулканическая деятельность [2]. Они проявляются в регионах с новейшей тектономагматической активизацией и повышенной сейсмичностью. Как правило, температура воды в зоне разгрузки таких источников не превышает 70 °С. Это

напрямую влияет на химический состав термальной воды, который представлен в виде формулы М.Г. Курлова для наиболее высокотемпературного выхода № 14 ($t = 48\text{ }^{\circ}\text{C}$):

$$M_{0.604} = \frac{SO_4 61 (HCO_3 + CO_3) 22 F 10 Cl 7}{(Na + K) 97 Ca 3} \quad pH\ 9.2 \quad H_4SiO_4\ 0.135 \quad F\ 0.0126.$$

В воде содержатся высокие концентрации ряда микроэлементов, характерных для азотных терм. Это литий, рубидий, цезий, вольфрам, германий, галлий. Содержание сероводорода составляет от 4.0 до 7.5 мг/дм³. Газовый состав характеризуется абсолютным преобладанием азота (более 95 об. %). Содержание гелия в термах до 1.15×10^{-2} мл/дм³. Даже в роднике в пойме р. Ихэ-Тайрисин-Гол, дренирующем надмерзлотные воды делювиального склона реки, концентрация гелия составляет 1.44×10^{-4} , что в 2.8 раза превышает фоновые значения в природных водах. Высокие концентрации гелия объясняются приуроченностью очагов разгрузки источников к разломам глубокого заложения. Данные по изотопному составу воды термальных источников ($\delta^{18}\text{O} = -17.62\text{ }‰$, $\delta D = -133.2\text{ }‰$) свидетельствуют о ее метеогенном происхождении.

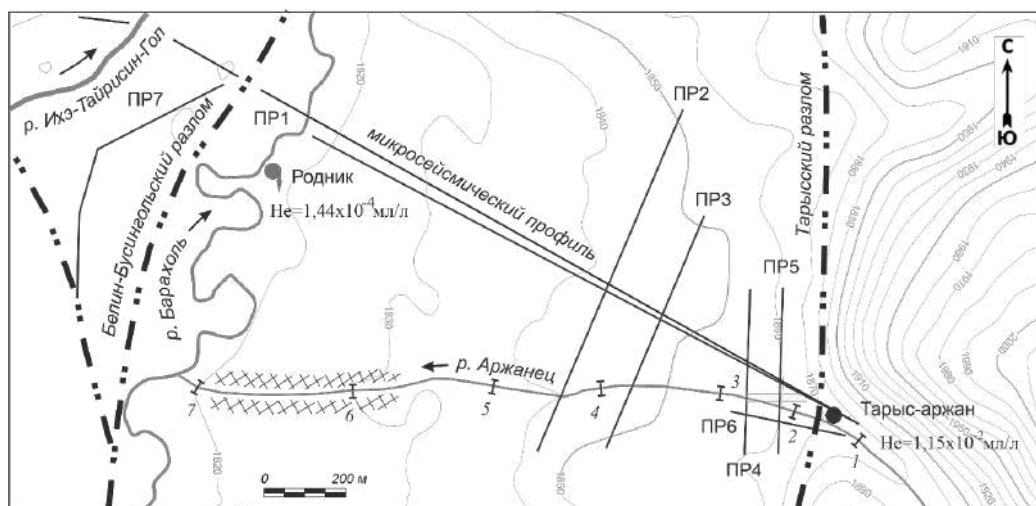


Схема расположения геофизических, микросейсмических профилей и гидрометрических створов в долинах рек Аржанец и Ихэ-Тайрисин-Гол.

В результате геофизических и микросейсмических исследований установлено, что наиболее высокотемпературные термальные воды выводятся на поверхность узкой зоной разлома (15–20 м) субмеридионального простирания на контакте тануольского плагиигранитного комплекса ($v\ \delta C_2 t_2$) и балыктыгхемской свиты (RF bl), представленной мраморами, кварцитами, кристаллическими сланцами и имеющей крутое (под углом 80–85°) падение на запад. Мощность делювиально-аллювиальных отложений изменяется от 1–2 м в районе источников до 15–18 м в пойме р. Ихэ-Тайрисин-Гол. По микросейсмическим данным глубина заложения кулисообразных разломов Тарысского и Белин-Бусингольского более 2.5 км. Они имеют высокую степень активности. Сейсмичность исследуемого района по данным Чылбак А.А. составляет 8–9 баллов по шкале MSK-64 [9].

Предварительная оценка запасов термальных вод произведена по данным единичных замеров дебитов родников [5]. Источники разбиты на три группы, каждая из которых имеет общий сток и только источники первой группы имеют двойной выход. В одном из них расход измерен гидрометрической вертушкой ГР-21, в остальных – объемным способом. Дебит источников первой группы составляет 0.32 л/с (27.6 м³/сут), второй группы – 0.80 л/с (69.1 м³/сут), суммарный дебит третьей группы 5.54 л/с (449 м³/сут). Общий сток всех источников равен 6.66 л/с, или 575.4 м³/сут. Для контроля измерен расход воды в р. Аржанец до и после выхода термальных вод. В первом случае он составил 45 л/с, во втором – 52 л/с. Суммарный дебит всех источников по приточности в р. Аржанец составил 7 л/с (605 м³/сут).

Невязка определения по двум методам минимальна и не превышает погрешности измерения расходов воды, что свидетельствует о приемлемой точности измерений. Все замеры были произведены в бездождевой период в течение одного дня 01.07.2025 г. По архивным данным суммарный дебит источников был измерен в летний период трижды в разные годы. В 1954 г. Валединский В.И. оценил общий сток в 7.5 л/с (650 м³/сут), в 1965 г. Фомичева В.Н. – в 12.2 л/с (1054 м³/сут), в 1966 г. Пиннекер Е.В. – в 2.4 л/с (207 м³/сут), при этом неизвестно, каким способом был измерен дебит и проводился ли контроль измерений. Нами также были проведены измерения расходов воды в р. Аржанец. В устьевой части реки происходит более чем трехкратное уменьшение стока с 52–57 л/с в створах № 3, 4 до 15–21 л/с в створах № 6, 7, что может быть связано с потерей стока в рыхлые пойменные отложения р. Бора-Холь в зоне регионального Белин-Бусингольского разлома.

Азотные термальные воды, по мнению многих исследователей, обладают постоянством дебита и химического состава на протяжении многих лет, поэтому с определенной долей допущения можно оценить запасы термальных вод по данным единичных замеров. Для подтверждения этого высказывания на Тарысских термальных источниках запланировано измерение дебита в осенний период и в конце лимитирующего периода в марте с отбором проб воды на химический анализ. Для оценки влияния климатических факторов (осадки, температура) на сток будет изучен весь ряд наблюдений по ближайшим метеостанциям и постам, хотя известно, что в термальных источниках, формирующихся на большой глубине, такие изменения могут носить вековой характер.

Для предотвращения негативного влияния добычи полезных ископаемых необходимо рассмотреть возможность создания зон и округов санитарной (горно-санитарной) охраны источников. Атмосферные осадки и поверхностные воды в области формирования Тарысских источников по зонам активных разломов будут проникать на большую глубину и искать выход на поверхность, в том числе в виде геотермальных источников. Добыча полезных ископаемых в бассейне р. Ихэ-Тайрисин-Гол окажет на источники термальных вод не сиюминутное, а что гораздо хуже – отложенное воздействие.

Работа выполнена при поддержке Минлесхоза РТ, Тувинского отделения РГО и в рамках темы государственного задания ИЗК СО РАН (рег. №121042700218-2).

Список литературы

1. Богородицкий К.Ф. Валединский В.И. Гидроминеральные ресурсы (Тувинской АО) // Природные условия Тувинской автономной области. Труды Тувинской комплексной экспедиции. М.: Изд-во АН СССР. Вып. III. 1957. С. 105–128.
2. Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: ГЕО, 2007. 222 с.
3. Горбатов А.В. Возможность оценки параметров геологических объектов на основе использования фонового микросейсмического поля. Результаты экспериментальных исследований и моделирования // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы международной сейсмологической школы / Под. ред. А.А. Маловичко и др. Обнинск, 2006. С. 66–71.
4. Зинченко В.С. Петрофизические основы гидрогеологической и инженерно-геологической интерпретации геофизических данных: Учеб. пособие для студентов ВУЗов. Тверь: Изд-во АИС, 2005. 392 с.
5. Инструкция по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод к месторождениям лечебных минеральных вод. 1984. 16 с.
6. Левченко В.М. Минеральные источники и грязевые озера Тувинской Народной Республики. Записки государственного гидрологического института. Л. Т. 14, 1935.
7. Пиннекер Е.В. Минеральные воды Тувы. Кызыл: Тув. кн. изд., 1968. 105 с.
8. Фомичева В.Н. Отчет о комплексном обследовании гидроминеральных и грязевых ресурсов Тувинской АССР. М., 1966.
9. Чылбак А.А., Саая К.Г., Амыр-оол Р.О. Анализ сейсмичности территории Республики Тыва // Вестник Тувинского государственного университета. 2022. Т. 3, № 4, С. 39–47.

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ИССЫК-КУЛЬСКОГО МЕЖГОРНОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАСЕЙНА

Барановская Е.И.¹, Харитонов Н.А.¹, Челноков Г.А.²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва,
baranovskaya_kat@mail.ru, tchenat@mail.ru

²Геологический институт РАН, Москва, *geowater@mail.ru*

Аннотация. В работе приведены результаты комплексных гидрогеохимических исследований минеральных вод Иссык-Кульского межгорного артезианского бассейна (Северный Тянь-Шань). На основе новых данных по макро- и микрокомпонентному составу, стабильным изотопам ($\delta^{18}\text{O}$, δD), а также результатов петрографо-геохимического изучения водовмещающих пород установлены главные факторы формирования минеральных вод. Показано, что состав вод контролируется типом вмещающих пород и глубиной циркуляции. Изотопный состав подтверждает метеорное происхождение вод. Определена бальнеологическая ценность изученных вод.

Ключевые слова: минеральные воды, гидрогеохимические условия, изотопный состав, межгорные бассейны, Иссык-Куль

Abstract. The article presents the results of comprehensive hydrogeochemical studies of mineral waters in the Issyk-Kul intermountain artesian basin (Northern Tien Shan). Based on new data on major and trace element composition, stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, δD), as well as the results of petrographic and geochemical studies of water-bearing rocks, the main factors of mineral water formation have been established. It is shown that the water composition is controlled by the type of host rocks and the depth of circulation. The isotopic composition confirms the meteoric origin of the waters. The balneological value of the studied waters has been determined.

Keywords: mineral waters, hydrogeochemical conditions, isotopic composition, intermountain basins, Issyk-Kul

Сложный горный рельеф Тянь-Шаня, включающий глубокую расчлененность и высотную поясность, определяет особые гидрологические и гидрогеологические условия формирования природных вод. Осевые части хребтов, расположенные на больших высотах, конденсируют атмосферную влагу, формируя ледники, которые служат основным источником питания рек и подземных вод.

В пределах Северного Тянь-Шаня выявлено множество источников минеральных вод, различных по температуре, минерализации, химическому и газовому составу [2, 3, 5, 6]. Одной из наиболее перспективных в бальнеологическом отношении территорий является область Иссык-Кульского межгорного артезианского бассейна, где функционируют многочисленные курорты, использующие как естественные выходы минеральных вод, так и воды из глубоких скважин.

Несмотря на длительную историю изучения, современные систематические гидрогеохимические исследования региона до последнего времени были ограничены. Новые данные по химическому и изотопному составу, полученные в ходе полевых работ 2023–2024 гг., позволили уточнить представления о механизмах формирования минеральных вод и факторах, контролирующих их состав.

Целью работы явилось установление гидрогеохимических условий и механизмов формирования минеральных вод Иссык-Кульского межгорного артезианского бассейна на основе анализа их химического, изотопного и микрокомпонентного состава.

Иссык-Кульская впадина представляет собой позднекайнозойскую межгорную депрессию, ограниченную хребтами Кюнгей-Ала-Тоо и Терскей-Ала-Тоо. Она выполнена мезокайнозойскими континентальными отложениями молассового типа мощностью до 5 км. В разрезе выделяется два геологических этажа: нижний – дислоцированные домезозойские осадочные, метаморфические и магматические породы (фундамент), и верхний – слабодислоцированные мезокайнозойские отложения (чехол). Домезозойские образования формируют фундамент впадин и горные хребты Тянь-Шаня, а мезокайнозойские отложения заполняют впадины.

В гидрогеологическом отношении Иссык-Кульская межгорная впадина является межгорным артезианским бассейном, где пластово-поровые воды осадочного чехла сочетаются с трещинными и трещинно-жильными водами кристаллического фундамента [1, 4]. Минеральные воды района распространены в различных гидрогеологических структурах – в артезианских бассейнах межгорного типа, где ассоциируют с неогеновыми отложениями межгорных впадин, и в гидрогеологических складчатых областях.

В основу работы легли результаты полевых исследований 2023–2024 гг., в ходе которых были отобраны атмосферные осадки, пробы поверхностных вод (озеро и реки), минеральные воды из скважин и естественных выходов. Параллельно с опробованием вод проведен отбор образцов пород, представляющих как фундамент (граниты, монцодиориты, аплиты), так и осадочный чехол бассейна (известняки, алевриты).

Лабораторные исследования выполнены в лабораториях ДВГИ ДВО РАН и ГИН РАН и включали определение макрокомпонентов методом ионной хроматографии (Shimadzu LC-20); определение микроэлементов, включая РЗЭ, методом ICP-MS (Agilent 7700); определение стабильных изотопов воды ($\delta^{18}\text{O}$, δD) на лазерном анализаторе Picarro; анализ пород комбинацией методов ICP-AES, ICP-MS и петрографическое описание шлифов.

Минеральные воды Иссык-Кульского бассейна существенно различаются по температуре, минерализации и химическому составу. Температура воды на выходе варьируется от 16 до 52 °С. По этому параметру воды разделены на холодные (<20 °С), теплые (20–37 °С), очень теплые (37–50 °С) и горячие (>50 °С). Явной корреляции между температурой воды и глубиной ее отбора не установлено, что указывает на сложный характер циркуляции.

Воды преимущественно слабощелочные (рН 7.4–9.8) и формируются в восстановительной обстановке (Еh до –160 мВ).

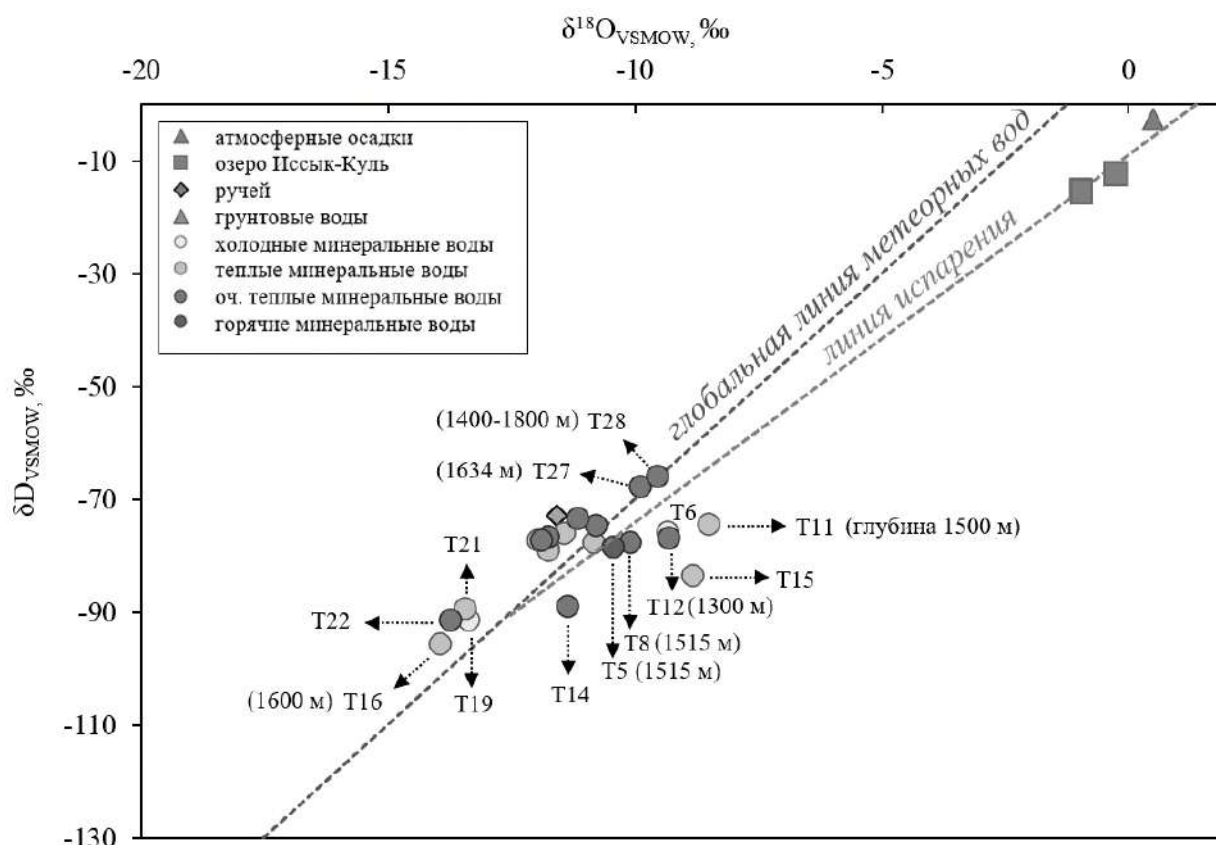
Минерализация варьируется от 0.3 до 34.0 г/дм³ и зависит от приуроченности к гидрогеологической структуре. Воды осадочного чехла характеризуются повышенной минерализацией (1.2–35.0 г/дм³) и относятся к Cl-SO₄-Na и SO₄-Cl-Na (Na-Ca) типам. Воды кристаллических массивов в большинстве случаев являются слабоминерализованными (0.3–12.8 г/дм³) и часто имеют гидрокарбонатно-хлоридный состав с повышенной долей HCO₃⁻ (>20 %-экв.).

В катионном составе устойчиво преобладает натрий. Соотношение Na/Cl, близкое к 1, в водах осадочного чехла указывает на растворение галогенных толщ. Повышенные значения Na/Cl (>1.2) в водах кристаллических массивов отражают дополнительное поступление натрия за счет выщелачивания алюмосиликатов.

Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$ от –14 до –8 ‰, δD от –96 до –66 ‰) свидетельствует о преимущественно метеорном происхождении вод. Большинство проб располагается вдоль глобальной линии метеорных вод [7], что подтверждает их инфильтрационный генезис (рисунок). Наблюдаемые изотопные сдвиги связаны с обменом в системе вода – порода – газ и усиливаются при повышенной температуре.

Высокогорные реки и источники содержат более тяжелые изотопы. Наиболее высокие значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD (–0.5 и –16 ‰ соответственно) выявлены в водах оз. Иссык-Куль, что отражает процессы испарительного концентрирования в условиях бессточного водоема. Для рек наблюдается отчетливая высотная зависимость между содержанием в воде δD и точкой опробования, однако для минеральных вод данная корреляция отсутствует, что свидетельствует о значительном фракционировании изотопного состава при взаимодействии с водовмещающими толщами.

Содержание микроэлементов варьируется в широких пределах и контролируется типом водовмещающих пород и физико-химическими условиями. Концентрации фтора изменяются от 0.3 до 19.2 мг/дм³. Максимальные значения характерны для вод кристаллических массивов, где фтор поступает при гидролизе фторсодержащих слюд. Положительная корреляция F с Si и температурой подтверждает их общий источник.



Распределение изотопов δD и $\delta^{18}O$ в природных водах Иссык-Кульского артезианского бассейна.

Содержания брома ($0.1\text{--}11.6 \text{ мг/дм}^3$) и бора ($0.2\text{--}19.4 \text{ мг/дм}^3$) возрастают с увеличением минерализации. Высокие значения Cl/Br (>300) указывают на концентрирование древних рассолов как основной источник брома.

Концентрации лития (до 5.54 мг/дм^3), рубидия (до 0.5 мг/дм^3) и стронция (до 46.9 мг/дм^3) максимальны в высокоминерализованных водах осадочного чехла.

Суммарное содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) невелико ($0.07\text{--}0.81 \text{ мкг/дм}^3$) и подчиняется обратной зависимости от pH. Спектры распределения характеризуются преобладанием легких лантаноидов над тяжелыми.

Сопоставление химического состава минеральных вод с результатами петрографо-геохимического изучения водовмещающих пород позволило выявить источники ряда микроэлементов.

Установлено, что известняки среднего карбона, выступающие в роли основного коллектора в восточной части бассейна, до 30 % сложены раковинами фораминифер, что объясняет высокие концентрации стронция (до 46.9 мг/дм^3) в водах этого района. Карбонатные толщи также содержат повышенные количества бария (до 33.2 г/т) в форме виверита ($BaCO_3$), что контролирует содержание Ba в пластовых водах.

Гранитоиды и монцодиориты фундамента содержат минералы биотит и мусковит (источники F, Li, Rb), а также турмалин (источник B). Этим объясняется обогащение вод кристаллических массивов фтором (до 19.2 мг/дм^3) и бором.

Алевриты и угленосные отложения осадочного чехла являются вероятным источником мышьяка (до 65.5 мкг/дм^3) для пластовых вод южной части бассейна.

Изучение вторичных минеральных фаз, отложившихся у выхода источника, где преобладает NaCl с примесью сульфатов, наглядно подтверждает процессы испарительного концентрирования растворов в зоне разгрузки.

Выявленные типы минеральных вод имеют высокую бальнеологическую ценность. Воды с повышенным содержанием кремния, фтора и бора традиционно применяются для лечения заболеваний сердечно-сосудистой системы и нарушений обмена веществ. Многие источники активно используются местным населением в качестве питьевых столовых вод, а на базе месторождений (Джеты-Огуз, Ак-Суу, Чолпон-Ата) с середины XX века функционируют бальнеологические санатории.

Таким образом, геологическое и тектоническое строение региона, а также сложные гидрогеологические условия определяют разнообразие минеральных вод по химическому составу, минерализации и температуре.

Изотопный состав вод свидетельствует об их метеорном генезисе. Исследуемые воды региона имеют исходно метеорное происхождение с отчетливо выраженным высотным эффектом, а фракционирование изотопов обусловлено вторичными наложенными процессами.

Микрокомпонентный состав отражает состав водовмещающих пород: воды кристаллических массивов обогащены F, Li, Rb, воды осадочного чехла – Sr (до 46.9 мг/дм³), Br (до 11.6 мг/дм³), В (до 19.4 мг/дм³), As (до 65.5 мкг/дм³).

Исследование выполнено при поддержке РНФ, проект № 25-27-00122 «Источники и условия формирования солевой компоненты минеральных вод межгорных артезианских бассейнов».

Список литературы

1. Гидрогеология СССР. Киргизская ССР. Т. 40. М.: Недра, 1971.
2. Барановская Е.И., Харитонов Н.А., Челноков Г.А., Ермаков А.В. Изотопно-гидрогеохимическая характеристика термоминеральных вод Иссык-Кульского артезианского бассейна // Вестник московского университета. Серия 4. Геология. 2024. (5):142–156. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-5-142-156>.
3. Мандычев А.Н. Подземные воды Иссык-Кульского бассейна // Озеро Иссык-Куль: природные условия // Научные серии НАТО: IV. Земля и экологические науки. 2002. Том 13. С. 71–76.
4. Матыченков В.Е., Иманкулов Б.И. Минеральные воды Киргизии. Фрунзе: Илим. 1987. 251 с.
5. Подземные минеральные воды Киргизской ССР / Н.И. Катаева, З.И. Мельникова, Р.Д. Барсуцкая и др. Фрунзе, 1969. 142 с.
6. Харитонов Н.А., Соколовская М.А., Барановская Е.И., Челноков Г.А., Карабцов А.А., Чернощев Л.Н., Брагин И.В. Микроэлементы в термальных водах северного Тянь-Шаня: распределение и механизмы накопления // Вестник московского университета. Серия 4. Геология. 2024. (4). С. 70–86. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-4-70-86>.
7. Craig H. Standard for reporting concentration of deuterium and oxygen 18 in natural waters // Science. 1961. Vol. 133, № 3466. P. 1833–1834.

К КОНЦЕПЦИИ ГЛУБИННОГО МАГМАТОГЕННОГО ИСТОЧНИКА РЗЭ И ЛИТИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ РАССОЛАХ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Вахромеев А.Г.^{1,2}, Данилова М.А.^{2,5}, Демидова Е.В.³, Левин А.В.², Мисюркеева Н.В.¹,
Кирюхин А.В.⁴, Сергеева А.В.⁴, Квачко С.К.², Погребная Д.А.¹, Горохов А.П.²

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, *andrey_igr@mail.ru*

²Спец. институт гидроминерального сырья ИГРГИ, Красноярск

³ООО "Сибгаз", Иркутск

⁴Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

⁵Сибирская школа геонаук, ИРНИТУ, Иркутск

Аннотация. Успешность целевых ГРП всегда базируется на корректной геолого-генетической модели месторождения. Освоение крупных и сверхкрупных (КСКМ) гидроминеральных месторождений бор-литиеносных провинций областей миоцен-четвертичного вулканизма и генетически связанных с ними месторождений лимнических толщ – это общемировая тенденция. Рассмотрены геологические и геохимические аргументы за вулканогенно-гидротермальное обогащение артезианских бассейнов Сибирской платформы рудными элементами, редкими и рассеянными металлами. Магматическая и вулканическая деятельность и обусловленные ею пневматолитово-гидротермальные циклы сформировали локализованную разгрузку флюидных рудоформирующих систем по активизированным трещинам фундамента в природные резервуары осадочного чехла под мощные флюидоупорные галогенные толщи.

Ключевые слова: *металлогения лития и РЗЭ, промышленные редкометалльные литиеносные рассолы, магматогенно-гидротермальные системы, Сибирская платформа*

Abstract. The success of targeted geological exploration is always based on a correct geological and genetic model of the deposit. The development of large and super-large (LSL) hydro-mineral deposits of boron-lithium-bearing provinces in the areas of Miocene-Quaternary volcanism and the genetically related deposits of limnic strata is a global trend. The article discusses the geological and geochemical arguments for the volcanogenic-hydrothermal enrichment of the artesian basins of the Siberian Platform with ore elements, rare metals, and scattered metals. Magmatic and volcanic activity and the resulting pneumatolitic-hydrothermal cycles have formed localized unloading of fluid ore-forming systems through activated fracture systems in the basement into natural reservoirs of the sedimentary cover under thick halogen-bearing strata.

Keywords: *lithium metallogeny, industrial rare-metal lithium-bearing brines, magmatogenic-hydrothermal systems, Siberian Platform*

Промышленные редкометалльные рассолы Сибирской платформы – относительно новый для России металлогенический тип литиеносного сырья, хотя около 80 % мирового производства карбоната лития обеспечивает гидроминеральное сырье. Более 20 лицензионных участков на промышленные воды сегодня оформлено на юге Сибирской платформы, активно проводятся ГРП, поставлены на госбаланс запасы первых месторождений.

Успешность целевых ГРП и оптимальные объемы глубокого бурения всегда базируются на корректной геолого-генетической модели месторождения, однако в этом вопросе представления геологов и гидрогеологов пока существенно расходятся. Детальное знакомство с литературой в области металлоносных рассолов континентальных осадочных толщ артезианских бассейнов показывает, что гидрогеология промышленных рассолов древних платформ [1, 2, 14, 15] развивается без учета концепции формирования рудоносных гидротерм и лимнических толщ [16, 17] молодых вулканогенно-гидротермальных и лимнических провинций мира – концепции глубинного, мантийного источника некогерентных лития и бора [15–17]. Все эти провинции расположены [15] около геодинамически активных конвергентных границ литосферных плит. Рассматривая процессы рудо- и минералообразования в циклах вулканической и гидротермальной деятельности, геологи акцентируют внимание на геохимических барьерах сброса и концентрирования вещества [8, 10, 17]. И здесь надо отметить, что общее концентрирование хлоридных систем до эвтоники не приводит к предельным значениям концентраций наиболее актуального для промышленности элемента – лития. Самое высокое его содержание (723 мг/дм³) в промышленных рассолах Сибирской платформы на порядок ниже предельно возможных

значений. В докладе представлены геологические и геохимические аргументы вулканогенно-гидротермального обогащения артезианских бассейнов Сибирской платформы рудными элементами, редкими и рассеянными металлами. Новая концепция вторичного концентрирования и обогащения промышленных рассолов базируется не только на классических представлениях об эволюционном преобразовании подземной гидросферы [14] глубоких горизонтов осадочного чехла Сибирской платформы и коры выветривания кристаллического фундамента [1, 2, 14, 15], но и на представлениях об импульсно проявившихся этапах континентального магматизма Сибирской платформы от протерозоя к мезозою с учетом этапов геодинамической активности коры кратона в результате событий плей- и плюм-тектоники этой территории [6, 9, 10, 16]. Рассматривая магматические события в пределах кратона, как имевшие место до солеродного цикла V-Є₁, так и синхронные с этим периодом и более поздние, наложенные циклы базитового магматизма, мы не можем игнорировать важнейшую роль магматизма в импульсном, но крайне масштабном преобразовании природных резервуаров и флюидных рассольных систем осадочного чехла [5, 6, 10–12, 17–19, 20]. Преобразование шло многоэтапно, и каждое магматическое событие запускало длительные постмагматические гидротермальные циклы, на порядок превышавшие длительность магматического этапа.

Важнейшими аргументами магматогенного, вулканогенного генезиса лития для нас стали полевые и лабораторные исследования вулканогенно-осадочных отложений раннего кембрия [18, 19] в пределах Ангаро-Ленского палеопрогиба (юг Сибирской платформы): в нижнекембрийских галогенно-карбонатных отложениях обнаружен и обоснован новый генетический тип литиевого оруденения, определены главные рудообразующие минералы лития – гекторит и литиофорит. Установлено, что литиеносная минерализация сформировалась в результате внедрения флюидно-насыщенных растворов в осадочный чехол платформы вдоль глубинных разломов. Процесс сопровождался флюидно-эксплозивной активностью и образованием крупных масс флюидолитов. Металлогенические закономерности формирования редкометалльной минерализации обоснованы литолого-фациальным и геохимическим анализом [18, 19] – сформировалась система мелководных лагун с повышенной соленостью [1, 6], позже перекрытая с востока надвиговыми секторами Байкало-Патомской складчатой области [2, 6, 13]. Вулканогенно-гидротермальный этап в раннем кембрии выделен [18, 19] по следам катастрофических событий, вероятно связанных с подводным вулканизмом. Установлено, что гидротермальная деятельность в этот период обеспечила привнос вулканогенного материала и формирование кольцевых структур, обогащенных редкоземельными элементами (РЗЭ). Накопление лития обусловлено [18, 19] сочетанием двух факторов – наличием в карбонатах специфического вулканогенного материала (источника Li, F, Rb, Cs) и аридным (жарким и засушливым) климатом кембрийского периода, способствовавшим первичному концентрированию элементов в лагунах. Возможно [18, 19], формирование хемогенных отложений с туфогенным материалом происходило синхронно с гидротермальными подводными излияниями систем типа «черных курильщиков». Это привело к накоплению соединений лития и РЗЭ в раннекембрийских вулканогенно-осадочных толщах.

Опираясь на модель [15] и представления авторов статей [18, 19], которые базируются на значительном по объему полевом и геологическом материале, отметим, что вулканическая деятельность и обусловленные ею пневматолитово-гидротермальные циклы, имевшие место на юге Сибирской платформы, как «синхронные» в раннем кембрии, так и «наложенные» в последующие этапы, сформировали локализованную разгрузку флюидных рудоформирующих систем по активизированным трещинным системам фундамента в природные резервуары осадочного чехла под мощные флюидоупорные галогенные толщи.

Отталкиваясь от новейших данных геологоразведочных работ на промышленные редкометалльные рассолы, полученных на юге Сибирской платформы [2, 3, 5, 6, 11], авторы доклада по-новому трактуют явление гидрогеохимической инверсии, которое не укладывается в классические положения о гидрогеохимической зональности

концентрированных рассолов глубоких горизонтов зоны замедленного водообмена осадочного чехла. Новейшие данные ГРР, в свою очередь, в целом соответствуют общей геодинамической модели эволюции Сибирского кратона от неопротерозоя до наших дней [6, 9, 10, 11–13, 18, 19] и крупных рассолоносных систем. Направленное изменение концентрации целевых элементов может говорить о перераспределении, миграции редких металлов по проницаемым коровым разломам кристаллического фундамента в осадочный чехол с накоплением на определенных участках под мощными солевыми флюидоупорами на этапах континентального магматизма [4, 7, 11–13, 19]. Отмечено особое строение «наложенной» магматогенно-гидротермальной системы в чехле, где пневматолитово-гидротермальные потоки «работали» в поднадвиговые слоистые трещинные резервуары [6, 7, 11, 13], последовательно растворяя солевые флюидоупоры именно выше уровня внедрения базитовой магмы [7, 11], основной объем которой продвигался по уровню осинского горизонта усольской свиты. И одновременно рассолы кипели, с удалением воды-растворителя в виде пара в пародоминирующем резервуаре, концентрируя хлоридные системы до расплава водных кристаллогидратов бишофита, тахигидрита и антарктицита [7, 11, 18]. Это вело к направленному концентрированию в системе редких металлов, и в первую очередь лития. Именно рассолы усольской и бельской свит характеризуются наиболее высокими значениями полезных элементов – лития, рубидия, цезия, а также калия, брома и магния. По данным лабораторных анализов литийсодержащих пород [18, 19] для них характерно повышенное содержание Y, Yb, Cr, Ba, Sr, Ni, Rb, Cs, K, F, Sr, Cu, Co, Ni, V, Zr и Sn. Согласно работам [19, 20], это один из результатов флюидной декомпрессии. Ранее элементы Y, Yb, Sr, Rb, Cs, K, Ta, Nb, Mo, W, Eu, Ce, Zr, Hf были определены нами [5] в промышленных рассолах с концентрированием в 10^5 – 10^6 относительно кларковых значений, что говорит об единстве процесса и о вероятном мантийном источнике [5, 7–9, 11, 15, 16]. Процесс эвакуации пара как газовой фазы из замкнутых объемов межсолевых залежей приводил к концентрированию ионов редких и редкоземельных металлов. Такая модель накопления элементов в замкнутом резервуаре – тот же процесс концентрирования лития в аридных областях, но со своими особенностями.

Таким образом, в продолжение [5, 6, 10, 11] разработки концептуальной модели рассмотрен глубинный, мантийный источник редких металлов и РЗЭ, поставлявший их в верхнюю кору и осадочный чехол в условно «синхронные» этапы геодинамической и магматической деятельности [6, 9–11, 12, 16, 17], и вторичное концентрирование хлоридных систем, связанное с этапами внедрения базитовой магмы Сибирского плюма [9]. Одним из важнейших был процесс ассимиляции магмой водных хлоридных растворов при движении магмы по проницаемым каналам фильтрации. Следующим важным процессом следует считать концентрирование летучих компонентов в магме при ее дробной кристаллизации. Этим процессом обеспечивалось перемещение флюидно-разгазированной магмы именно в апикальные области гигантской по площади магматической камеры, впоследствии застывающей в виде силлов. Разрядка дегазации флюидной составляющей этих камер в прилегающей области природных резервуаров чехла обеспечила обогащение природных хлоридных систем летучими компонентами, например хлоридом лития, высокоподвижным при температуре от 400 °С и выше. В процессе испарительного концентрирования морской воды солеродных бассейнов щелочные элементы длительное время сохраняются в растворе-рассоле. Рубидий и цезий далее соосаждались с калийными солями, особенно с карналлитом, литий же концентрировался, оставаясь в жидкой фазе в рассолах до эвтоники.

Список литературы

1. Анциферов А.С. Гидрогеология древнейших нефтегазоносных толщ Сибирской платформы. М.: Недра, 1989. 176 с.
2. Алексеев С.В., Вахромеев А.Г., Коцупало Н.П., Рябцев А.Д. Промышленные рассолы Сибирской платформы (гидрогеология, бурение и добыча, переработка, утилизация). Иркутск: Географ, 2014. 161 с.

3. Болдырев В.В., Буйнов Н.М., Вахромеев А.Г. и др. Литиеносные поликомпонентные глубинные рассолы гидроминеральной провинции Сибирской платформы и их использование в качестве сырьевой базы для создания новых производств в Иркутской области // Вестник РАН. 2025. № 9. С. 16–26.
4. Вахромеев А.Г. Минерагения концентрированных рассолов осадочного чехла Сибирской платформы // Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых. 2002. Вып. 25. С. 86–97.
5. Вахромеев А.Г., Корольков А.Т. Геодинамические события, предопределившие особенности металлогении лития в промышленных рассолах Сибирской платформы // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научной конференции. Иркутск, 2023. Вып. 21. С. 32–36.
6. Вахромеев А.Г., Данилова М.А., Погребная Д.А. и др. Геологическая модель формирования Ангаро-Ленского месторождения промышленных литиеносных рассолов – геодинамический, гидрогеохимический аспекты // Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский, 2024. С. 69–73.
7. Владимиров А.Г. Геохимические тенденции концентрирования лития в земной коре и на ее дневной поверхности // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 3, ч. 1. С. 59–62.
8. Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Иванов А.В. и др. Фанерозойский базитовый магматизм южного фланга Сибирского кратона и его геодинамическая интерпретация // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 9. С. 1222–1239.
9. Гордиенко И.В. Связь субдукционного и плюмового магматизма на активных границах литосферных плит в зоне взаимодействия Сибирского континента и палеоазиатского океана в неопротерозое и палеозое // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2019. V. 10(2). P. 405–457.
10. Данилова М.А., Вахромеев А.Г., Левин, А.В. Кирюхин А.В., Сергеева А.В. Древние магматогенно-гидротермальные системы вулканогенно-осадочного чехла Сибирской платформы // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научной конференции. Иркутск, 2025. Вып. 23. С. 75–77.
11. Данилова М.А., Вахромеев А.Г., Корольков А.Т., Демидова Е.В. Металлогения лития промышленных рассолов Сибирской платформы с современных геодинамических позиций // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научной конференции. Иркутск, 2025. Вып. 23. С. 72–74.
12. Мисюркеева Н.В., Вахромеев А.Г. Зона форланда Байкало-Патомского надвигового пояса Сибирской платформы: влияние на формирование углеводородных и гидротермальных систем // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит. Владивосток, 2025. С. 78–81.
13. Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Шварцев С.Л. и др. Основы гидрогеологии. Общая гидрогеология. Новосибирск: Наука, 1980. 225 с.
14. Пиннекер Е.В. Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна. М.: Наука, 1966.
15. Романюк Т.В., Ткачев А.В. Геодинамический сценарий формирования крупнейших мировых неоген-четвертичных бор-литоносных провинций. М.: «Светоч Плюс», 2010. 304 с.
16. Рундквист Д.В., Ткачев А.В., Черкасов С.В. и др. Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. Т. 1. Глобальные закономерности размещения. М.: ИГЕМ РАН, 2006. 390 с.
17. Сергеева А.В., Вахромеев А.Г., Кирюхин А.В. и др. Взаимодействие магмы и соляных отложений как этап формирования предельно насыщенных редкометалльных рассолов Сибирской платформы // Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа: Материалы всероссийской научной конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский, 2024. С. 108–111.
18. Tyumentseva M.I., Akulov N.I., Melnikov A.I. New genetic type of lithium mineralization // *Solid Earth Sciences*, 2024. V. 9(3):100194. <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2024.100194>.
19. Tyumentseva M.I., Akulov N.I., Melnikov A.I. Lithium-bearing Cambrian Fluidolites of the Angara–Lena Foredeep, South Siberian Platform // *Current Research on Geography, Earth Science and Environment*. 2025. Vol. 1. Ch. 6. P. 121–153.
20. Wang C., Yu X., Li R., Liu L., Yan K., You C. Origin of Lithium–Potassium-Rich Brines in the Jiangnan Basin, South China: Constraints by Water–Rock Reactions of Mesozoic–Cenozoic Igneous Rocks // *Minerals*. 2021. 11(12):1330.

ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, ОЛЕДЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД В ПРИБАЙКАЛЬЕ

Голубев В.А

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, golubev@crust.irk.ru

Аннотация. Рассмотрены причины совпадения районов проявления в Прибайкалье: 1) последнего - Сартанского – оледенения (24–11 тыс. лет назад), 2) выходов термальных вод на земную поверхность, 3) высоких скоростей современного подъема горных массивов, 4) участков дна озера с тепловым потоком более 200 мВт/м². Все эти факторы ярко выражены в северной части Прибайкалья. Показано, что затухание в южном направлении ближайшего к нам оледенения и более длительный рифтогенез привели к исчезновению гидротермальных систем на берегах и дне Южного Байкала.

Ключевые слова: оледенения, гидротермальные источники, Прибайкалье

Abstract. The reasons for the coincidence of activity zones in the Baikal region have been examined: 1) the last (Sartan) glaciation (24–11 thousand years ago), 2) locations of thermal water discharge, 3) high rates of present-day uplift of mountain ranges, 4) lakebed areas with heat flow exceeding 200 mW/m². All these factors are clearly expressed in the northern part of the Baikal region. It has been shown that the attenuation of the most recent glaciation towards the south and the longer duration of rifting have led to the disappearance of hydrothermal systems along the shores and on the bottom of Southern Lake Baikal.

Keywords. glaciations, hydrothermal vents, Baikal region

В Прибайкалье известно свыше 60 источников термоминеральных вод. Химический облик, изотопный состав и другие характеристики указывают на их инфильтрационное происхождение. Они формируются из метеогенных вод, которые через поверхность горных хребтов проникают на большую глубину и далее, используя субгоризонтальные трещинно-жильные разрывные нарушения, перемещаются к смежным рифтовым впадинам под действием топографически обусловленного гидравлического напора [2, 3, 6]. Согласно данным гидрогеохимических SiO² и Na-K-Ca геотермометров, температура терм Прибайкалья на глубине их формирования находится в пределах 62–142 и 31–164 °С соответственно и в среднем составляет около 100 °С [4]. Такую температуру метеогенные воды приобретают, нагреваясь в региональном тепловом поле, опустившись на глубину 4–6 км и более, где они насыщаются различными химическими соединениями и уже в качестве термоминеральных вод поднимаются к земной поверхности по прибортовым разломам рифтовых впадин. При подъеме их температура снижается в среднем до 46 °С из-за отдачи тепла в стенки термовыводящих каналов и смешивания с холодными близповерхностными водами [3, 4].

Основная часть источников термальных вод Прибайкалья локализована в пределах Верхнеангарской и Баргузинской рифтовых впадин, а также вдоль региональных разломов, ограничивающих Северобайкальскую котловину оз. Байкал [2, 3, 6]. Выходы термальных вод в этих впадинах и пункты экстремально высоких тепловых потоков на дне Байкала (более 200 мВт/м² [3]), а также участки земной поверхности с высокими скоростями ее современного подъема (до 22 мм/год) приурочены к районам таяния горно-долинных ледников, спускавшихся к этим впадинам во время последнего плейстоценового оледенения.

Одним из ключевых параметров, влияющих на функционирование гидротермальных систем, является проницаемость горных пород. Наличие высокопроницаемых субвертикальных трещинных разломных зон инфильтрации и разгрузки подземных вод в условиях латерального растяжения земной коры БРЗ не вызывает сомнений. Менее очевидно существование сквозных достаточно проницаемых зон их транзита, расположенных под горными хребтами и их склонами на глубине 4–6 км и более и вытянутых субгоризонтально в сторону рифтовых впадин на расстояние ~ 20 км (среднее расстояние от горных хребтов Прибайкалья до смежных рифтовых впадин).

Известно не менее трех крупных оледенений и разделяющих их межледниковых потеплений, имевших место в Прибайкалье в последние 0.2 млн лет. Ближайшее из них

Сартанское оледенение существовало здесь 24–11 тыс. лет назад. За ним последовало современное голоценовое потепление, охватившее Прибайкалье, как и другие регионы Земли [5]. Во время этого оледенения поверхность горных хребтов Северного Прибайкалья была покрыта ледниками и большая часть атмосферных осадков расходовалась на их наращивание. В этот период верхняя часть Байкальского, Баргузинского, Верхнеангарского, Северо-Муйского и Южно-Муйского горных хребтов Северного Прибайкалья, а также долины стекающих с них рек были охвачены горно-долинными ледниками. Во время максимума Сартанского оледенения мощность Баргузинского ледника составляла 800 м [5]. Давление на земную поверхность такой толщи льда достигает 730 т/м^2 . При смещении к югу толщина ледника быстро снижалась и в районе дельты Селенги он уже отсутствовал.

Начавшееся около 11 тыс. лет назад потепление привело к таянию ледников, что уменьшило давление на поверхность их основания, и, как следствие этого, к подъему горного обрамления Байкала. Наибольшая скорость современного подъема гор зафиксирована на севере Прибайкалья в районах максимальных высот Северо-Муйского хребта. Согласно данным повторного нивелирования, она здесь достигает 22 мм/год [5], что сопоставимо со скоростью постледникового подъема Фенноскандии [1]. Как и в других районах, недавно лишившихся ледниковых покровов, основным механизмом постгляциального подъема гор Прибайкалья является изостазия. Существенно то, что этот подъем может происходить и посредством иных механизмов. Верхняя хрупкая часть земной коры повсеместно трещиновата. Современные данные свидетельствуют о способности трещиноватой коры к деформациям, превышающим чисто упругую компоненту сплошного твердого тела, поэтому в районах недавних оледенений высота земной поверхности не только меняется посредством изостазии, но зависит также и от обратимых и необратимых деформаций верхнего хрупкого слоя горных пород на глубине от 0 до 10 км и более. Сдавливание этого слоя нарастающим весом ледника и соответствующее сокращение его вертикального размера составляло в Фенноскандии 100 м. Это чисто упругое сокращение верхнего слоя земной коры с доледниковой его толщиной 10 км [1]. При последующем таянии ледника этот упругий верхний слой коры восстановил (увеличил) свой вертикальный размер до его доледникового состояния. Но реальная земная кора содержит и заполненные флюидами большие объемы трещинных макропоровых пространств, вертикальные размеры которых тоже подвержены изменениям из-за меняющегося веса залегающего над ними нарастающего/тающего ледника. Вертикальные деформации этих трещинных макропоровых пустот в слое земной коры толщиной 10 км не полностью обратимы, а обусловленные ими изменения толщины этого слоя являются дополнительными к обратимым упругим его изменениям и сравнимы с ними по величине. Так, связанное с последним ледником суммарное изменение толщины верхнего слоя земной коры Фенноскандии ΔH , обусловленное как упругими ее деформациями $\Delta H_{упр}$, так и сопровождающими их изменениями объемов трещинных макропоровых пространств $\Delta H_{тр}$, достигало 190 м, что почти в два раза больше изменений толщины этого слоя упругой природы [1]. Толщина последнего ледникового покрова Фенноскандии составляла 2–3 км, что в несколько раз превышает толщину ледников Северного Прибайкалья. Из этих сравнений следует, что, как и в Фенноскандии, любая вертикаль, проходящая сквозь верхние слои гор Северного Прибайкалья, должна встретить появившиеся при снятии ледниковой нагрузки заполненные флюидами трещинные пустоты, суммарная мощность которых $\Delta H_{тр}$ составляет десятки метров. В межледниковые периоды, в том числе и в наше время, эти пустоты максимально раскрыты. Но так как трещинные деформации не полностью обратимы, то и во время оледенений часть этих пустот остается открытой, и они служат каналами для субгоризонтального перемещения подземных вод.

Под действием меняющихся ледовых нагрузок и связанных с ними упругих деформаций блоки земной коры, отделенные друг от друга разломами, меняют свои не только вертикальные, но и горизонтальные размеры и тем самым влияют на раскрытость отделяющих их друг от друга субвертикальных разломных трещинных пространств.

Отношение величины горизонтальной составляющей упругой деформации к вызвавшей ее вертикальной известно как коэффициент поперечных деформаций, или коэффициент Пуассона. Для кристаллических пород верхней части земной коры его среднее значение составляет 0.25, то есть упругие изменения горизонтальных размеров ΔL ее фрагментов составляют 1/4 от величины вызвавших их вертикальных упругих деформаций $\Delta H_{упр}$. В Фенноскандии в период максимума последнего оледенения обусловленное ледниковой нагрузкой упругое сокращение верхней толщи коры, как уже отмечалось выше, составляло 100 м [1]; следовательно, связанное с ним упругое горизонтальное расширение верхних блоков земной коры, имеющих в латеральном направлении размеры порядка 10×10 км, в это время достигало порядка 20–30 м. В горах Северного Прибайкалья упругое боковое расширение таких блоков в период оледенения могло составлять несколько метров. С исчезновением ледниковой нагрузки в межледниковое время блоки восстанавливают (сокращают) свои горизонтальные размеры, что ведет к увеличению объемов разделяющих их субвертикальных трещинных пространств и, соответственно, к росту вертикальной составляющей гидравлической проницаемости. Следовательно, после исчезновения ледниковой нагрузки на земную кору Северного Прибайкалья произошел рост обеих составляющих ее проницаемости: горизонтальной – за счет частично обратимых неупругих (трещинных) деформаций и вертикальной – связанной (через коэффициент Пуассона) с ее обратимыми упругими деформациями.

Глубокая современная (последледниковая) инфильтрация метеогенных вод на хребтах, латеральное их движение к рифтовым впадинам, нагрев их при этом в региональном геотермическом поле и, наконец, разгрузка этих – уже термальных – вод в пределах самих впадин должны влиять на величину измеренного (близповерхностного) теплового потока. На Байкале выполнено свыше тысячи его измерений. Осреднение величин по площадкам дна озера в совокупности с результатами осреднения потока по другим рифтовым впадинам Прибайкалья дает 72 ± 24 мВт/м², что в два раза выше 35 ± 15 мВт/м² – среднего теплового потока в скважинах горного обрамления этих впадин [3]. В цитируемой работе на количественной основе показано, что это двукратное различие средних не соответствует глубинному тепловому режиму, а обусловлено переносом тепла потоками подземных вод от горного обрамления рифтовых впадин к самим этим впадинам. С переходом на более значительные глубины различия в тепловом режиме под этими основными рифтовыми структурами Прибайкалья уменьшаются. В северной его части, где сосредоточено большинство гидротермальных источников, в это перераспределение большой вклад вносят подземные воды, перемещающиеся по проницаемым зонам, возникшим при исчезновении ледниковой нагрузки последнего оледенения.

Как видим, все четыре обсуждаемые геолого-геофизические особенности региона – площади, охваченные Сартанским оледенением, большие скорости современного подъема земной поверхности, выходы термальных вод и сопутствующие этим выходам высокие тепловые потоки – локализованы в одном и том же районе Прибайкалья и связаны с его последним оледенением.

Различия в продолжительности рифтогенеза тоже, по-видимому, могли оказать влияние на размещение современных гидротерм в Прибайкалье. Юго-западная часть рифтовой зоны с ее центральным звеном – Южно-Байкальской впадиной – начали формироваться около 30 млн лет назад, а длительность рифтогенеза в районе Северо-Байкальской впадины и к северо-востоку от нее на порядок меньше. За время более длительного развития юго-западный фланг рифтовой зоны подвергался воздействию значительно большего числа землетрясений, оледенений и других трещинообразующих факторов. В итоге, к настоящему времени он оказался более сильно и равномерно разбит взаимосвязанными трещинами различных направлений. В нем уже отсутствуют консолидированные блоки земной коры, в которых сохранились достаточно высокотемпературные гидротермальные системы, не подвергавшиеся разбавлению более холодными близповерхностными водами. Иными словами, южная часть Прибайкалья уже

“пережила” период своего развития, когда в ней существовали гидротермальные системы, подобные встречаемым севернее. Это надо учитывать при поисках месторождений термальных вод на берегах юго-западной части Байкала.

Таким образом, таяние ледников последнего плейстоценового оледенения на севере Прибайкалья привело к формированию здесь в верхней части земной коры больших макротрещинных пустот, используемых подземными водами при их движении от горных хребтов к рифтовым впадинам. Именно здесь локализовано большинство современных термальных источников Прибайкалья. Снижение интенсивности этого оледенения в южном направлении и более длительный рифтогенез привели к исчезновению гидротермальных систем на берегах и дне Южного Байкала.

Список литературы

1. Богданов В.И., Малова Г.И. Проблемы современной изостазии и масштабные эффекты трещиноватости земной коры континентов и океанов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 3. С. 3–17.
2. Борисенко И.М., Замана Л.В. Минеральные воды Бурятской АССР. Улан-Удэ: Бурятское книжное изд-во, 1978 162 с.
3. Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2007. 222 с.
4. Голубев В.А. Тепловые и химические характеристики гидротермальных систем Байкальской рифтовой зоны // Советская геология. 1982. № 10. С. 100–108.
5. Леви К.Г., Мирошниченко А.И., Козырева Е.А., Кадетова А.В. Модели эволюции озерных бассейнов Восточной Сибири в позднем плейстоцене и голоцене // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Геохронология. Этнология. Антропология. 2015. Т. 11. С. 55–85.
6. Ломоносов И.С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука, 1974. 164 с.

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ЛИТИЯ В ПОДЗЕМНЫХ РАССОЛАХ

Гусева Н.В., Запригалова В.А., Хващевская А.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, gusevanv@tpu.ru

Аннотация. В связи с глобальным энергопереходом и дефицитом лития актуальной становится оценка нетрадиционных гидроминеральных источников. Рассолы представляют собой стратегический резерв литиевой промышленности России. В работе исследованы геохимические закономерности накопления Li в хлоридных артезианских водах. Установлен диапазон его концентраций, и выявлена тесная корреляция с макрокомпонентами. Доказано, что максимальное обогащение литием характерно для рассолов натриево-кальциевого типа с низкими значениями rNa/rCa (от сотых до единиц).

Ключевые слова: литий, подземные рассолы, гидрогеохимия, Сибирская платформа, натриево-кальциевый тип вод

Abstract. Due to the global energy transition and the growing lithium deficit, the assessment of unconventional hydro-mineral resources is becoming increasingly relevant. The brines of the Siberian Platform represent a strategic reserve for the lithium industry in Russia. This study investigates the geochemical patterns of Li accumulation in deep chloride artesian systems. The range of Li concentrations has been determined, and a strong correlation with major components has been established. It has been proved that maximum lithium enrichment is characteristic of sodium-calcium brines with low rNa/rCa values (ranging from hundredths to units).

Keywords: lithium, underground brines, hydrogeochemistry, Siberian Platform, sodium-calcium water type

Литий отнесен к критически важным стратегическим металлам в связи с развитием электротранспорта и возобновляемой энергетики. Россия, обладая значительными прогнозными ресурсами (около 1 млн т), полностью зависит от импорта литиевого сырья (до 71 % из Чили) [1–3]. В сложившихся условиях актуально создание собственной сырьевой базы, возможно, за счет «нетрадиционных источников» – подземных рассолов [4–6].

Мировой опыт показывает, что промышленные концентрации лития в подземных водах формируются в результате сложных геохимических процессов – гидротермальной активности, взаимодействия в системе вода – порода при повышенной температуре [6–8]. Так, для Сибирской платформы характерны уникально высокие содержания Li (до 745 мг/дм³) в хлоридных рассолах, что на порядки превышает возможности простого испарительного концентрирования морской воды [2]. Однако факторы, контролирующие накопление металла в различных химических типах вод, остаются недостаточно изученными.

Цель работы – выявление особенностей поведения лития в различных химических типах подземных рассолов на основе анализа представительной базы гидрогеохимических данных.

Исследование выполнено по данным 827 проб хлоридных артезианских вод Сибири, отобранных в период 2000–2024 гг. Химический состав определялся методами титриметрии, пламенной фотометрии и турбидиметрии. Содержание лития измерялось методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на приборе NexION 300D. Использование обширной базы гидрогеохимических данных, собранной с использованием современных методов, позволяет на новом уровне оценить распространенность лития в рассолах.

Для выявления геохимических закономерностей все пробы были разделены на 34 типа по соотношению катионов (с учетом содержания >5 %-экв). Статистическая обработка включала корреляционный анализ и оценку связей Li с макрокомпонентами и параметрами среды (минерализация, pH, rNa/rCa).

Концентрация лития в исследованных водах варьируется от 0.001 до 375 мг/дм³ при среднем значении 1.4 мг/дм³. Корреляционный анализ показал, что литий имеет сильные положительные связи с минерализацией ($r=0.77$), хлором ($r=0.78$), кальцием ($r=0.78$), магнием ($r=0.72$) и калием ($r=0.78$), связь с натрием заметно слабее ($r=0.50$) (таблица).

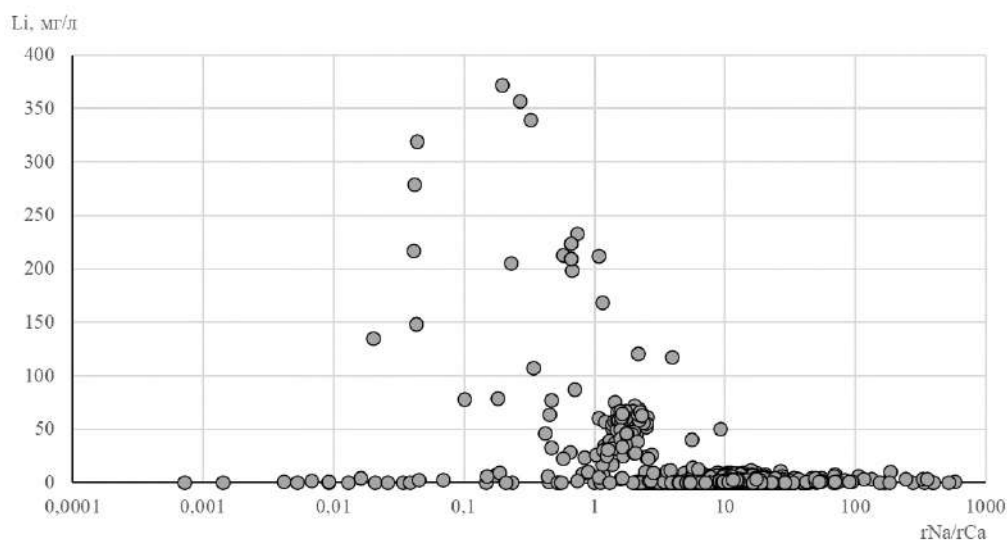
Корреляционная матрица

	<i>M</i>	<i>pH</i>	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	<i>Li</i>
<i>M</i>	1.00									
<i>pH</i>	-0.68	1.00								
HCO ₃ ⁻	-0.31	0.40	1.00							
SO ₄ ²⁻	0.45	-0.47	-0.18	1.00						
Cl ⁻	1.00	-0.68	-0.32	0.44	1.00					
Ca ²⁺	0.89	-0.66	-0.28	0.30	0.88	1.00				
Mg ²⁺	0.90	-0.65	-0.29	0.37	0.90	0.83	1.00			
Na ⁺	0.81	-0.49	-0.25	0.48	0.81	0.46	0.64	1.00		
K ⁺	0.67	-0.39	-0.13	0.22	0.67	0.71	0.64	0.34	1.00	
<i>Li</i>	0.77	-0.46	-0.18	0.25	0.78	0.78	0.72	0.50	0.78	1

Примечание. Критическое значение коэффициента корреляции при $p < 0.05$ составляет 0.07.
M – минерализация рассолов.

Установлена обратная зависимость содержания лития от величины *pH* – минимальные концентрации приурочены к щелочным водам.

Наиболее информативным параметром, контролирующим накопление лития, является отношение *rNa/rCa* (рисунок). Максимальные концентрации (более 100 мг/дм³) фиксируются в интервале значений *rNa/rCa* от 0.01 до 1.0, то есть в водах с относительным преобладанием кальция над натрием. При увеличении *rNa/rCa* >10 содержание лития резко снижается, не превышая первых мг/дм³.



Зависимость концентрации лития от величины *rNa/rCa* в хлоридных рассолах.

Анализ распределения лития по выделенным химическим типам (34 типа) показал, что максимальное обогащение характерно для смешанных кальциево-натриевых и натриево-кальциевых вод с участием магния. Наиболее представительные типы (Na, Na-Ca, Na-Ca-Mg) охватывают более 600 проб и демонстрируют устойчивое возрастание *Li* по мере усложнения катионного состава и роста доли щелочно-земельных элементов.

В результате выполненных исследований было установлено, что в хлоридных артезианских рассолах концентрации лития варьируются от 0.001 до 375 мг/дм³, при этом максимальные значения сопоставимы с промышленными рассолами мировых литиеносных провинций. Основными геохимическими факторами, контролирующими накопление лития, являются высокая минерализация, хлоридный фон, присутствие катионов Ca, Mg, K и низкие

значения рН. Ключевым поисковым критерием служит величина $r_{Na/rCa}$ в диапазоне 0.01–1.0, отражающая степень метаморфизации рассолов и интенсивность взаимодействия в системе вода – порода. Наиболее перспективны для извлечения лития воды смешанного натриево-кальциевого и кальциево-натриевого типа с повышенным содержанием магния.

Исследование выполнено в рамках государственного задания РФ «Наука» (проект FSWW-2026-0045).

Список литературы

1. Боярко Г.Ю., Хатьков В.Ю., Ткачева Е.В. Сырьевой потенциал лития России // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 12, С. 7–16.
2. Михеева Е.Д., Егоров Я.А. К вопросу о содержаниях лития и попутных компонентов в подземных водах перспективных площадей территории России // Науки о Земле: Добыча и переработка. 2022. № 4. С. 45–55.
3. Рябцев А.Д. Гидроминеральное сырье – неисчерпаемый источник лития в XXI веке // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307, № 7. С. 64–70.
4. Юрчик И.И. Литий в рассолах Сибирского солеродного бассейна // Интерэкспо ГЕО-Сибирь, 2024. Т. 2, № 1. С. 247–250. DOI: 10.33764/2618-981X-2024-2-1-247-250.
5. Bottomley D.J., Chan L.H., Katz A., et al. Lithium Isotope Geochemistry and Origin of Canadian Shield Brines // Ground Water, 2003. Vol. 41, No. 6. P. 847–856.
6. Dugamin E.J.M., Cathelineau M., Boiron M.-C., et al. Lithium enrichment processes in sedimentary formation waters // Chemical Geology. 2023. Vol. 635: 121626.
7. Sanjuan B., Gourcerol B., Millot R. et al. Lithium-rich geothermal brines in Europe: An up-date about geochemical characteristics and implications for potential Li resources // Geothermics. 2022. Vol. 101: 102385.
8. Yan K., Wang C., Chen R., et al. Origin and evolution of deep lithium-rich brines in the southwest Jiangnan Basin, central China: Evidence from hydrochemistry and stable isotopes // Journal of Hydrology. 2023. Vol. 626: 130163.

ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЛИТИЕВЫХ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ РАССОЛОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВЛИЯНИЯ ТРАППОВОГО МАГМАТИЗМА НА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЕ

Данилова М.А.^{1,2}, Вахромеев А.Г.^{1,3}, Левин А.В.¹, Губин И.А.¹, Сергеева А.В.⁵,
Корзун А.В.^{1,4}, Лыков Р.С.¹, Мешкова А.В.¹, Рогов В.И.¹, Горохов А.П.¹, Формугина И.А.¹

¹ООО «РН-ГИР», Красноярск, *mart16@mail.ru*

²Сибирская школа геонаук ИРНИТУ, Иркутск

³Институт земной коры СО РАН, Иркутск

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

⁵Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

Аннотация. Основная проблема формирования крупных месторождений промышленных редкометалльных рассолов на Сибирской платформе – приуроченность к карбонатным коллекторам с низкими фильтрационно-емкостными параметрами (свойствами). Воды с концентрациями лития, рубидия, цезия, стронция, брома в рассолах, превышающими минимально промышленные в несколько раз, только в сочетании с высокими дебитами могут рассматриваться как экономически рентабельные и перспективные для разработки объекты. В связи с этим понимание модели формирования месторождений, определение основных факторов, влияющих на трещиноватость и кавернозность вмещающих пород, вплоть до карстовых проявлений, дают возможность прогноза поиска месторождений промышленных вод.

Ключевые слова: *промышленные литиевые воды, магматизм, кембрий, Сибирская платформа*

Abstract. The main fundamental problem in the formation of large-scale deposits of industrial rare-metal brines on the Siberian Platform is the low reservoir properties of the host carbonate deposits in the inter-salt brine-bearing layers. The concentrations of lithium, rubidium, caesium, strontium, and bromine in brines exceed the minimum industrial concentrations by several times, but only in combination with high flow rates can they be considered economically cost effective and promising for development. In this regard, understanding the model of deposit formation and identifying the main factors affecting to fracturing and cavernosity of the host rocks, up to karst occurrence, makes it possible to predict the search for industrial water deposits.

Keywords: *lithium-bearing industrial groundwater, magmatism, Cambrian, Siberian platform*

Установлено, что промышленные рассолы с самыми высокими концентрациями лития и других сопутствующих элементов на Сибирской платформе приурочены к межсолевым галогенно-карбонатным горизонтам нижнего кембрия (усольская (пласт Б1), бельская (пласты А4, А6) и булайская (пласт А3) свиты). При этом максимальные концентрации элементов и минерализация часто отмечаются в рассолах пластов бельской свиты, но фильтрационные параметры этих горизонтов преимущественно невысокие. В связи с этим выявление и обоснование перспективных участков природных рассолоносных резервуаров в первую очередь будут строиться на обосновании модели формирования зон с улучшенными фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС). В отличие от пласта Б1, являющегося нефтенасыщенным, вследствие чего достаточно хорошо изученным, вышележащие пласты (А4, А6) практически не изучены.

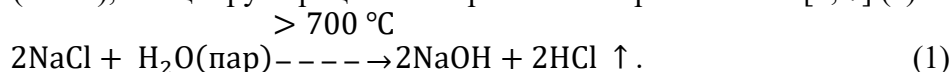
На примере скважин лицензионных участков ПАО «НК «Роснефть» по результатам изучения данных геоинформационных систем (ГИС) было выявлено, что пласты А4 и А6 представляют собой кальцит-доломитовые разности, осложненные локальным наличием интервалов окремнения и ангидритизации. Структура емкостного пространства характеризуется засолением и наличием невытесняемого органического вещества (преимущественно, залечивающего трещины). Пласты четко определяются в разрезах скважин, имеют региональное распространение и выдержанные параметры в пределах всей южной части платформы. Фильтрационные параметры изучаемых объектов, рассчитанные по результатам интерпретации данных ГИС, следующие: коэффициент эффективной проницаемости рассолов в среднем варьируется в диапазоне от 0.3 до 10 мД. Разработанная петрофизическая модель показывает, что только 2–4 % пустотного пространства занято подвижным рассолом (динамическая емкость), остальная часть заполнена неподвижными флюидами: остаточными нефтью, битумом и рассолом. Подвижная часть рассолов в глубоких (более 900 м) рассолоносных горизонтах представляет собой упругие запасы. При значительном снижении давления производительность скважин уменьшается вплоть до

прекращения водопритоков, поэтому краткосрочные откачки не дают качественной информации о параметрах горизонта. На качественном уровне можно оценить дебиты скважин на уровне 10–70 м³/сут.

В настоящее время наш коллектив работает в рамках гипотезы о значимом воздействии масштабно проявленного траппового магматизма на изменение пород и состава рассолов [3, 9]. Зоны с улучшенными ФЕС должны фиксироваться в палеообластях влияния магмы мантийных силлов, но при условии наложения других факторов: геохимических (гидротермальных), палеогеографических и структурно-тектонических.

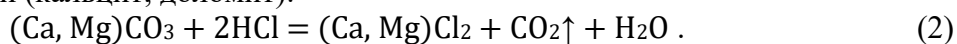
Рассмотрим подробнее каждый из этих факторов.

1. На этапе внедрения магмы мантийного силла высокой температуры (по разным оценкам она могла достигать 1100 °С и более) в рассолоносные карбонатные пласты, изолированные сверху и снизу мощными солевыми флюидоупорами, начинался процесс кипения рассолов с переходом воды в область сверхкритических значений (температура более 374 °С), что приводило к значимым изменениям ее свойств (так, в сверхкритической воде растворяются почти все органические вещества, но не растворяются неорганические, она обладает более низкой вязкостью, на 2–3 порядка большим коэффициентом диффузии и меньшей плотностью). При снижении температуры и при переходе критической точки происходит смена полярности растворителя с неполярного на полярный, начинается растворение неорганических веществ [8]. В этот момент начинается взаимодействие пара с солевыми покрывками (галит), инициируя процесс их термического разложения [4, 7] (1):



Возможно, именно с этим процессом связаны фиксируемые на сейсмических разрезах зоны «исчезновения» солей, так называемые гидрогеологические или эрозионные окна.

Образовавшийся в ходе реакции хлороводород вступает во взаимодействие с вмещающими породами (кальцит, доломит):



В результате данной реакции образуются гигроскопичные хлориды кальция и магния. Именно этот расплав хлоридов магния и кальция является базой формирования промышленных хлоридных магниево-кальциевых рассолов с целым спектром микроэлементов, обогащение которыми осуществляется с потоком вулканических газов, сопутствующих внедрению мантийного тела, а также на посттрапповом этапе – с гидротермальными флюидами [9]. Важно отметить, что процесс сопровождается активным выделением углекислого газа (CO₂), который смещает рН системы в сторону закисления изначально щелочной обстановки, создавая геохимические барьеры для концентрирования элементов. Еще одним процессом, который реализуется в данных условиях, является преобразование кальцитовых карбонатов в доломитовые в результате гидротермальной проработки [6], которое, по мнению ряда авторов, может сопровождаться увеличением пустотности и образованием трещин [2]. Это справедливо лишь при условии, что реакция завершается и освободившиеся ионы кальция полностью удаляются из системы. В противном же случае будет происходить уменьшение пустотного пространства [5]. Таким образом, увеличение или уменьшение пустотного пространства и, соответственно, формирование коллектора/неколлектора в результате процесса доломитизации, запущенного при внедрении мантийного силла в карбонатные породы, будут зависеть от возможности удаления из системы излишков реакции. В отсутствие возможности движения или его незначительных скоростей все продукты реакций с большой вероятностью останутся в этой фильтрационной системе до стабилизации равновесно-неравновесного процесса в ходе остывания, снижения давления и исчерпания энергии, что приведет к выпадению солей с уменьшением пустотного пространства и к снижению объема коллектора. Такая ситуация возможна над силлом, где вертикальное движение невозможно (солевые покрывки являются практически непроницаемыми для нормальных жидкостей, но проницаемыми для газов и жидкостей в сверхкритическом состоянии), а латеральное движение затруднено.

Иная ситуация будет происходить в апикальной части траппа [9]. Под давлением внедряющегося магматического тела, кипения рассолов на фронте внедрения и увеличения

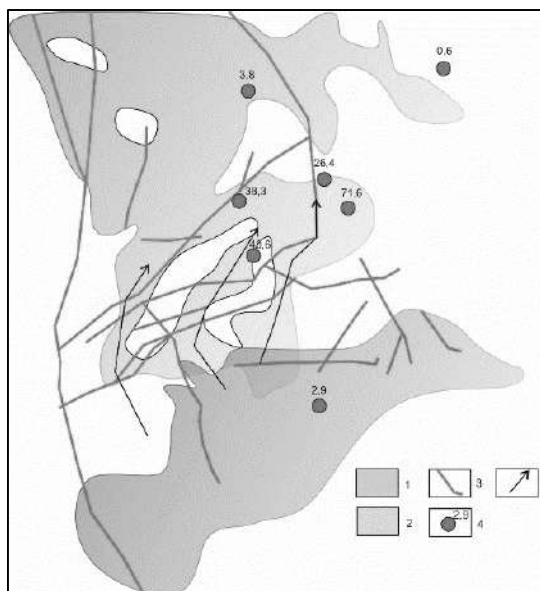
давления начинается латеральное движение парогазового фронта в область более низких значений давления. Движение парожидкостной фазы (в жидком и субкритическом состоянии) происходит при наличии зон разуплотнения (тектонической и кавернозной трещиноватости) либо при формировании новых зон трещиноватости за счет автоматического гидроразрыва пласта при повышении давления в системе сверхкритического. Химические реакции будут те же, но удаление из системы избытков пара, газа и продуктов реакции приводит к возможности увеличения пустотного пространства за счет процессов выщелачивания, глубинного карстования, доломитизации. Снижение энергии движения на некотором удалении от траппа с течением времени приведет к остыванию системы, замедлению всех процессов, выпадению легкорастворимых солей в пустотном пространстве карбонатных пород с полным его залечиванием и формированием слабопроницаемых границ и к «запечатыванию» залежей. Таким образом, в краевой части траппа предполагается зона карстования при наличии предпосылок (зон разуплотнения тектонической, карстовой природы) для продвижения парогазового флюида, конфигурация и размер которой будут определяться интенсивностью и длительностью влияния фронта парогидротермального потока на вмещающие породы.

2. Палеогеографические реконструкции на время образования пластов А4 и А6 показывают [3], что в пределах района исследований формирование карбонатных отложений происходило в условиях мелководного морского бассейна. Постоянство толщины пластов свидетельствует о спокойном и сравнительно равномерном прогибании территории и стабильности режима осадконакопления. Изучение структуры и строения по результатам интерпретации сейсморазведочных данных 3D позволило выявить в пределах Преображенского лицензионного участка на уровне атовского горизонта (А4) рифовые постройки площадью от 0.14 до 2.56 км². При условии попадания данных структур в зону влияния парогазовых флюидов повышается вероятность выявления месторождения промышленных вод.

3. Тектонический план региона представлен преимущественно сетью разломов северо-восточного и юго-западного направлений. Эти ослабленные зоны при их попадании в зону движения парогазового потока будут оказывать контролирующее влияние на направление движения. Кроме того, в районе работ широко проявлены процессы соляного тектогенеза, вероятно инициированного формированием Предбайкало-Патомского надвигового пояса. Зоны скупивания и нагнетания надосинских солей усольской свиты фиксируются в ядрах аллохтонных складок, как правило расположенных непосредственно над рифовыми постройками горизонта Б1. Постседиментационный рост соляных куполов сопровождался изгибом вышележащих слоев, в том числе карбонатных пластов группы «А», обладающих жесткой структурой. Деформация приводила к возникновению зон вторичной проницаемости. Максимальная концентрация трещин в пластах А4–А6 прогнозируется в апикальных частях брахиантиклиналей, навешенных над солянокупольными структурами. Учет данных условий позволяет спрогнозировать направление движения парогазовых потоков.

Рассмотренный алгоритм и предпосылки поиска месторождений промышленных вод реализованы на одном из ключевых участков. Авторами статьи выполнено комплексирование различных методов исследований. Так, по результатам интерпретации данных сейсморазведочных работ с применением атрибутного анализа и скважинным данным закартировано трапповое тело. Совмещение с картой разломов позволило определить предположительные направления движения парогазового фронта от силла, а по результатам интерпретации данных электроразведочных работ определено граничное условие сопротивления, соответствующее зоне максимального рассольного насыщения межсолевого природного резервуара (рисунок). Согласно имеющимся данным в зоне пониженных сопротивлений, сопоставимых с путями палеодвижения парогазового флюида, отмечаются более высокие дебиты откачек, чем за их пределами. Для подтверждения данных выводов и апробации такого подхода требуется заверка бурением и проведением качественных опытно-фильтрационных работ. Рассолонасыщенные пласты имеют высокий потенциал по содержанию ценных промышленных элементов и их целесообразно изучать при комплексном освоении ЛУ на УВС, поскольку они имеют высокую степень изученности

различными методами, что позволит добиться высоких результатов с применением минимальных трудозатрат на доизучение. При проведении дальнейшего эксплуатационного бурения на ЛУ необходимо заложить отбор изолированного керна и выполнение ОФР для изучения перспективных объектов промышленных вод. Такой подход позволит недропользователю сократить издержки и повысить добычу ценных/редких полезных ископаемых в соответствии с утвержденной стратегией РФ по наращиванию ресурсной базы редкоземельных элементов.



Прогнозная схема движения парогазового флюида на гидротермальном этапе в межсолевых пластах галогенно-карбонатной формации от апикальной части траппового тела, контролируемая структурно-тектоническим планом. 1 – тело траппа; 2 – зона пониженных сопротивлений (менее 60 Ом·м); 3 – разломы; 4 – скважина, число сверху дебит ($\text{м}^3/\text{сут}$); 5 – направление движения парогазового флюида.

Список литературы

1. Абрамов В.Ю., Пятаев А.А. Возможность формирования углеводородных систем термометаморфического генезиса и роль гидротермальных сверхкритических флюидов // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2021. Т.16, №1. С. 1–18.
2. Вахромеев А.Г., Кирюхин А.В., Литвинова И.В., Данилова М.А., Сурмаажав Д. Вулканогенно–тектоническая модель формирования рудолокализирующих структур и обогащения межсолевых залежей промышленных литиеносных рассолов Ангаро–Ленского артезианского бассейна, Сибирская платформа // Материалы XXVII конференции, посвященной Дню вулканолога. 27–29 марта 2024 г. ИВиС ДВО РАН. С. 199–202.
3. Вахромеев А.Г. Закономерности формирования и локализации месторождений промышленных рассолов в карбонатных каверново–трещинных резервуарах кембрия юга Сибирской платформы (по данным глубокого бурения, испытания скважин и полевой геофизики). Иркутск: Изд-во ИрНТУ, 2015. 248 с.
4. Мельников Н.В. Венд-кембрийский соленосный бассейн Сибирской платформы (стратиграфия, история развития). Новосибирск: СО РАН, 2009. 148 с.
5. Селли Р.К. Введение в седиментологию. М.: Недра, 1981;
6. Запивалов Н.П. Нанозффекты образования вторичных высокопродуктивных карбонатных коллекторов в карбонатных породах // Георесурсы. 2010. № 2 (34). С. 2–5.
7. Страхов П.Н. Причины ослабления корреляционных связей между условиями осадконакопления и емкостными свойствами карбонатных отложений. П.Н. Страхов. // Геология нефти и газа. 1996. № 9.
8. Сергеева А.В., Гладышкина А.В., Вахромеев А.Г., Кирюхин А.В., Данилова М.А., Карташева Е.В., Кузьмина А.А., Назарова М.А. Роль вулканизма в формировании литиеносных рассолов Сибирской платформы // «Донецкие чтения – 2025: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности». 2025. С. 325–327
9. Hanf N.W., Sole M.J. High-temperature hydrolysis of sodium chloride // Transactions of the Faraday Society. 1970. Т. 66. С. 3065–3074.
10. Huang H., Chen H., Huo F., Yang S., Chen A. Effects of Deep Fluids on Middle Permian Dolomite of the Western Sichuan Basin. Front. Earth Sci. 2022. 10:910453. doi: 10.3389/feart.2022.9104539.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И УСЛОВИЯ ЗАЛЕГАНИЯ РАССОЛОВ РИФЕЙСКОГО ВОДОНОСНОГО КОМПЛЕКСА В ПРЕДЕЛАХ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ КАМОВСКОГО СВОДА

Зарубов М.С.^{1,2}, Данилова М.А.^{1,3}, Юрчик И.И.¹, Ишков А.А.¹, Вахромеев А.Г.^{1,2},
Корзун А.В.⁴, Горохов А.П.¹

¹Филиал ООО «РН-ГИР», Красноярск, ZarubovMS@rn-gir.rosneft.ru

²Институт земной коры СО РАН, Иркутск

³Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

Аннотация. Камовский свод является крупной куполообразной геологической структурой, расположенной в вершинной части Байкитской антеклизы. Геологический разрез района представлен архейско-протерозойским кристаллическим фундаментом и перекрывающим его рифейско-фанерозойским осадочным чехлом. В пределах осадочного чехла сосредоточены большие запасы как углеводородного, так и гидроминерального сырья, представленного высокоминерализованными рассолами с промышленными содержаниями полезных элементов, таких как литий (Li), стронций (Sr), рубидий (Rb), бром (Br), бор (B), цезий (Cs).

Ключевые слова: промышленные подземные воды, рифейский водоносный комплекс, Камовский свод, рассолы, литий

Abstract. The Kamov Arch is a large dome-shaped geological structure located at the summit of the Baikite antecline. The geological cross-section of the region is represented by an Archean-Proterozoic crystalline basement and an overlying Riphean-Phanerozoic sedimentary cover. Within the sedimentary cover are concentrated large reserves of both hydrocarbon and hydromineral raw materials, represented by highly mineralized brines with industrial contents of useful elements such as lithium (Li), strontium (Sr), rubidium (Rb), bromine (Br), boron (B), and cesium (Cs).

Keywords: industrial groundwater, Riphean aquifer complex, Kamov arch, brines, lithium

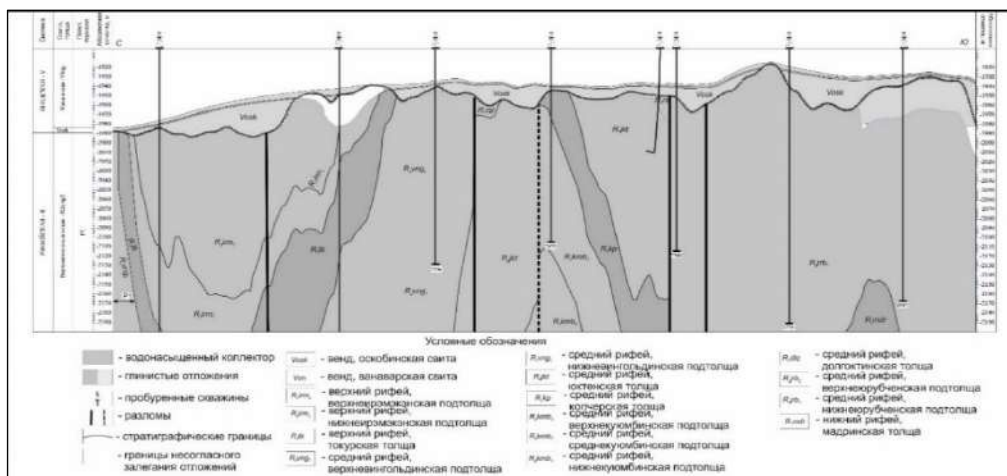
На фоне роста мировых цен на литий растёт интерес российских нефтяных компаний к возможности его извлечения из попутно добываемых промышленных вод. Нефтяные месторождения Камовского свода могут рассматриваться как объекты первоочередной реализации проектов по добыче гидроминерального сырья, так как в их пределах добыча углеводородов ведётся без применения ППД и все добытые попутные воды представлены крепкими промышленными рассолами без разубоживания концентраций микрокомпонентов.

Проблематикой формирования состава ресурсов рассолов и их промышленного освоения с 50-х гг. XX в. занимались такие известные ученые, как М.Г. Валяшко, Е.В. Пиннекер, С.Л. Шварцев, В.И. Вожов, М.Б. Букаты, А.А. Алексеев, Н.П. Коцупало, А.Д. Рябцев, А.А. Цхай, А.Т. Менжерес, А.Б. Орлова, но к практическому извлечению полезных компонентов отрасль подошла только в 2024 г. [4, 7].

Общие сведения о геологическом строении района работ. В тектоническом отношении исследуемый район находится в пределах северной части Камовского свода, расположенного в пределах Байкитской антеклизы. Геологический разрез разделяется на два структурных этажа: кристаллический фундамент и осадочный чехол. В свою очередь, осадочный чехол платформы подразделяется на два структурных яруса: рифейский и вендско-ордовикский, которые разделены угловым несогласием. В качестве стратиграфической основы в работе использована схема расчленения рифейских отложений Сибирской платформы и ее складчатого обрамления [8]. В пределах района выделяется большое количество тектонических нарушений и глубинных разломов, связанных с процессами рифтообразования, происходившими в раннем и среднем рифее [7].

Гидрогеологические условия района работ. В гидрогеологическом отношении район расположен в пределах Вельмовского артезианского бассейна. Разрез осадочного чехла разделяют на три гидрогеологических формации: надсолевую, соленосную и подсолевую (сверху вниз). Соленосная и подсолевая формации расположены в зоне затрудненного водообмена и сверху экранированы соленосными отложениями ангарской свиты, выступающими региональным водоупором [6]. Подсолевая формация включает

верхневендско-нижекембрийский водоносный комплекс, вендский водоносный комплекс, рифейский водоносный комплекс. Рифейский комплекс залегает на глубине более 2 км и имеет блоковое строение. Каждый блок изолирован друг от друга сетью флюидоупоров и непроницаемых тектонических разломов [1], что делает их замкнутыми гидродинамическими и гидрохимическими структурами, что подтверждается разницей в напорах, испытаниями скважин и данными о положении ВНК. Преобладающий тип коллектора – каверново-порово-трещинный. В пределах блоков выделяются нефтяные залежи, сосредоточенные в верхней части и занимающие 5–10 % коллектора, в то время как основная часть коллекторов насыщена рассолами. Геологический разрез со схематизацией условий залегания рифейского комплекса представлен на рисунке.



Принципиальный геологический разрез Камовского свода.

Химический состав рассолов. Крепкие промышленные рассолы рифейского ВК сформировались в результате захоронения водонасыщенных рифейских отложений. Позднее, в результате геологической эволюции, рассолы подверглись процессам метаморфизма, воздействию траппового магматизма в триасовом периоде и взаимодействию с глубинными термальными флюидами, поступающими из пород фундамента по глубинным разломам [7].

Горизонт ирэмэкэнской толщи $RF_{2irm1-2}$ приурочен к самому молодому стратиграфическому уровню рифея. Вмещающими отложениями являются доломиты, строматолитовые, слоистые, мощностью до 290 м. Верхний водоупор не выдержан и представлен слабопроницаемыми отложениями верхнеирэмэкэнской толщи, сложенной аргиллитами. Рассолы ирэмэкэнской толщи представляют собой крепкие и весьма крепкие рассолы, хлоридные рассолы натриево-кальциевого состава, с высоким процентом содержания магния. Формула химического состава промышленных рассолов имеет вид:

$$M228 - 362 \frac{Cl_{99.8-100}}{Ca_{36-52} Na_{26-50} Mg_{10-21}} pH_{3.9-6.0}. \quad (1)$$

Подземные воды ирэмэкэнской толщи отличаются по химическому составу от вод остальной части рифея более высокой минерализацией, преобладанием катионов натрия и магния над кальцием и пониженным (20–30 %) содержанием полезных компонентов, таких как литий (Li) и рубидий (Rb). К отложениям ирэмэкэнской толщи приурочен нефтеносный горизонт P_0 , который распространен локально и отмечается только в пределах залежей ЮК-5, ЮК-8 [5]. Водоупорный горизонт токурской толщи RF_{3tk} . Толща сложена преимущественно зелеными и зеленовато-серыми аргиллитами и выделяется в качестве флюидоупора с региональным распространением в пределах Камовского свода. Мощность толщи изменяется от 19.3 до 109 м.

Горизонт вингольдинской толщи RF_{2vng} . Толща сложена окремненными доломитами, мощностью до 606 м. Снизу подстилается отложениями рассолкинской толщи. Подземные воды вингольдинской толщи представляют собой крепкие и весьма крепкие

рассолы. По составу рассолы хлоридные, кальциево-натриевые. Соединение катионов магния изменяется в широком диапазоне. Формула химического состава промышленных рассолов имеет вид:

$$M209 - 330 \frac{Cl_{98.9-100}}{Na_{39-62} Ca_{25-44} Mg_{1-24}} pH_{4.6-6.4}. \quad (2)$$

Горизонт рассолкинской толщи RF₂rsI. Толща сложена неравномерно переслаивающимися глинистыми доломитами и аргиллитами мощностью до 187 м. Воды рассолкинской толщи представляют собой крепкие и весьма крепкие рассолы, хлоридные рассолы кальциево-натриевого состава. Катионы магния изменяются в широком диапазоне. Формула химического состава промышленных рассолов имеет вид:

$$M207 - 335 \frac{Cl_{98.7-100}}{Na_{52-62} Ca_{29-34} Mg_{1-13}} pH_{5.5-6.4}. \quad (3)$$

Горизонт юктенской толщи RF₂jkt. Толща сложена органогенными и органогенно-обломочными доломитами с подчиненными прослоями брекчиевых и хемогенных разностей мощностью до 246 м. Воды рассолкинской толщи представляют собой весьма крепкие рассолы, хлоридные кальциево-натриевого состава. Формула химического состава промышленных рассолов имеет вид:

$$M212 - 305 \frac{Cl_{99.8-100}}{Na_{50-61} Ca_{28-36} Mg_{1-13}} pH_{4.8-6.4}. \quad (4)$$

Горизонты в составе вингольдинской, рассолкинской и юктенской толщ, содержащие углеводороды, объединяют в надгоризонт Р₁. Надгоризонт распространен в пределах залежей ЮК-2, ЮК-4, Кам-1-2, Куюмбинская [3]. Все три горизонта имеют схожий химический состав и отличаются от остальных более низкой минерализацией с преобладанием катионов натрия над кальцием и более низким содержанием катионов магния и калия. Микрокомпонентный состав отличается более высоким содержанием лития, рубидия при более низком содержании брома.

Водоупорный горизонт копчерской толщи RF₂kr. Толща сложена аргиллитами с прослоями доломитов и глинистых доломитов. Вскрытая мощность отложений изменяется от 45 до 225 м. На большей части рассматриваемой территории данная толща рассматривается как флюидоупор.

Горизонт куюмбинской толщи RF₂kmb. Толща сложена фитогенно-обломочными и пластово-строматолитовыми доломитами и представляет собой чередование различных по толщине пачек общей мощностью до 607 м. Рассолы имеют хлоридный кальциево-натриевый состав с повышенным содержанием магния. Формула химического состава промышленных рассолов имеет вид:

$$M221 - 322 \frac{Cl_{99.6-100}}{Na_{38-58} Ca_{30-46} Mg_{8-22}} pH_{4.5-6.9}. \quad (5)$$

Горизонт долготкинской толщи RF₂dI. Толща представлена чередующимися пластами доломитов, глинистых доломитов, доломитовых мергелей и аргиллитов. Вскрытая мощность толщи составляет от 83 до 177 м. В качестве основного аниона выступает хлор, в качестве основного катиона – натрий, при этом доля катионов кальция и магния выше, чем в рассолах вингольдинской, рассолкинской и юктенской толщ. Формула химического состава промышленных рассолов имеет вид:

$$M206 - 299 \frac{Cl_{99.2-100}}{Na_{38-50} Ca_{34-44} Mg_{11-26}} pH_{3.5-6.2}. \quad (6)$$

Водоупорный горизонт мадринской толщи RF₁md. Толща представлена темно-серыми глинисто-доломитовыми породами мощностью от 191 до 547 м (средн. 300 м). Нижняя часть толщи сложена преимущественно глинистыми породами и рассматривается в качестве регионального флюидоупора, подстилающего рифейские природные резервуары. Горизонты отложений куюмбинской и долготкинской толщ объединяют в надгоризонт Р₂, так как он сверху и снизу изолирован глинистыми пачками копчерской и мадринской толщ. Горизонт Р₂ распространен в пределах залежей ЮК-1, ЮК-3, Кам-1-1 [3]. Комплекс Р₂ имеет состав, сходный с комплексом Р₁, отличаясь более высокой минерализацией и большей долей катионов кальция над натрием при более высокой концентрации магния. Обобщенные данные о химическом составе рассолов каждого комплекса приведены в таблице.

Сведения о компонентном составе промышленных рассолов рифея

№п/ п	Индекс	M	Na	K	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Li ⁺	Rb ⁺	Cs ⁺	Br ⁻	Na/Cl	(NaCl) /SO ₄	Cl/Br
		г/дм ³														
1	RF _{2irm1}															
2	RF _{2irm2}	320	40	4	12	52	208	200	24,2	33.0	3.1	0.03	3.5	0.68	-1043	136
3	RF _{2tok}															
4	RF _{2vng}	286	57	4	5.9	30	179	129	63	48.0	3.5	0.05	1.8	1.66	-945	231
5	RF _{2rsl}	286	57	5	5.6	28	178	82	68	47.4	3.4	0.04	1.6	1.77	-2265	278
6	RF _{2jkt}	283	61	4	5.6	30	175	319	51	45.6	3.4	0.04	2.4	1.76	-324	162
7	RF _{2kp}															
8	RF _{2kmb}	290	52	4	6.7	38	186	238	34	41.5	3.2	0.03	2.8	1.20	-616	142
9	RF _{2dl}	288	46	4	7.5	37	184	244	110	40.7	-	-	1.5	1.12	-630	214
10	RF _{1vdr}															

В разрезе рифейского водоносного комплекса наблюдается вертикальная зональность химического состава. Анализ генетических коэффициентов $rNa+/rCl-$, $(rNa+-rCl-)/rSO_4$ указывает на седиментационный, морской генезис рассолов, при этом значения коэффициента Cl/Br (менее 300) характерны для рассолов с невысокой степенью метаморфизации. Более молодой горизонт отложений RF_{2irm1-2} имеет наименьшую степень метаморфизации из всех, что может быть связано с более низкой концентрацией полезных компонентов данного горизонта. Зональность обусловлена особенностями исторического развития и осадконакопления в среднем рифее и сформировавшимся гидродинамическим режимом. Вмещающие отложения нижнего рифея (RF_{1vdr}) сформировались на этапе активизации рифта, в то время как среднерифейские толщи (RF_{2dl}, RF_{2kmb}, RF_{2kp}, RF_{2tok}, RF_{2vng}, RF_{2rsl}, RF_{2jkt}) формировались в условиях спокойного осадконакопления в период затухания рифта с изменением условий осадконакопления в копчерское время. В верхнем рифее (RF_{2irm1-2}, RF_{2tok}) произошли интенсивные сдвиги, приведшие к формированию многочисленных грабенов и блоков Камовского свода, определившие блоковую структуру отложений рифея.

На текущий момент для данного района отсутствует принятая схема расчленения гидрогеологического разреза рифейских отложений Байkitской антеклизы, а имеющиеся схемы ограничиваются подошвой кембрийского водоносного комплекса [2]. В то же время отложения рифея имеют достаточно высокую степень изученности в связи с многочисленными поисково-разведочными работами, проводимыми на углеводородное сырье. Данный материал в дальнейшем может стать основой для новой гидрогеологической стратификации.

Список литературы

1. Баранова М.И. Сдвиговая тектоника Куymbинского газонефтяного месторождения (Восточная Сибирь): Автореф. дис. к.г.-м.н. Новосибирск, 2011.
2. Барон В.А. Геологический отчет о научно-исследовательской работе по базовому проекту № 7.4-01/13 «Разработать рекомендации по общему гидрогеологическому районированию территории Российской Федерации» РФ (ФГУП «ВСЕГИНГЕО», ФГУП «Гидроспецгеология», 2015. С. 95–96.
3. Перспективные природные ресурсы Тунгусского артезианского бассейна: поликомпонентные рассолы, ароматические компоненты нефтей и конденсатов, природный водород, минеральные воды / А.К. Битнер, Р.Ш. Аюпов, Н.Ф. Орловская. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, Институт нефти и газа, 2023. 234 с.
4. Вахромеев А.Г. Месторождения промышленных поликомпонентных рассолов глубоких горизонтов гидроминеральной провинции Сибирской платформы // Вестник ИрГТУ. Науки о Земле. 2014. С. 73–78.
5. Конторович А.Э., Конторович А.А., Хоменко А.В. и др. Научный анализ и переинтерпретация геолого-геофизических материалов, в области лицензирования недр и воспроизводства минерально-сырьевой базы УВ на юго-востоке Байkitской антеклизы. Новосибирск: ИГНИГ СО РАН, 2002. С. 231–234.
6. Пиннекер Е.В. Проблемы региональной гидрогеологии. Закономерности распространения и формирования подземных вод. Новосибирск: Наука, 1977. С. 37–39.
7. Мельников Н.В., Якшин М.С., Шишкин Б.Б. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Рифей и венд Сибирской платформы и ее складчатого обрамления. Новосибирск: ГЕО, 2005. 428 с..
8. Харахинов В.В., Шеленкин С.И. Нефтегазоносность докембрийских толщ Восточной Сибири на примере Куymbинского и Юрубчено-Тохомского ареала нефтегазопрооявления. М.: Научный мир 2011. С. 33–40.

ПУЩИНСКИЕ ИСТОЧНИКИ УГЛЕКИСЛЫХ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД (КАМЧАТКА): ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И РЕСУРСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

Калачева Е.Г., Волошина Е.В.

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,
keg@kscnet.ru*

Аннотация. Пушинские теплые источники – очаг разгрузки долгоживущей гидротермальной системы. По химическому составу это слабокислые или нейтральные гидрокарбонатно-хлоридные натриевые воды, обогащенные рядом компонентов. Месторождение термоминеральных вод, выделенное на основе естественной разгрузки и разведочного бурения, обладает значительным ресурсным потенциалом: воды являются перспективным поликомпонентным гидроминеральным сырьем для извлечения редких щелочных металлов (Li, Rb, Cs), бора и стронция; воды пригодны для наружного применения (кремнистые и бромные термальные ванны). Высокое содержание бора и брома исключает их использование в качестве питьевых лечебно-столовых. Таким образом, Пушинские источники являются комплексным объектом, требующим дальнейшего изучения для определения оптимальных путей его рационального использования.

Ключевые слова: *термальные воды, Пушино, Камчатка, промышленный и бальнеологический потенциал*

Abstract. The Pushchino warm springs are a discharge zone of a long-lived hydrothermal system. Chemically, they are slightly acidic to neutral sodium chloride-bicarbonate waters enriched with a range of components. The thermomineral water deposit, identified based on natural discharge and exploratory drilling, holds significant resource potential: 1) The waters are promising multi-component hydromineral raw material for the extraction of rare alkali metals (Li, Rb, Cs), boron, and strontium. 2) The waters are suitable for external balneological use (siliceous and bromine thermal baths). However, their high boron and bromine content precludes their use as drinking or table medicinal waters. Thus, the Pushcha springs represent a complex resource requiring further comprehensive study to determine the optimal paths for its rational utilization.

Keywords: *thermal waters, Pushchino, Kamchatka, industrial and balneological potential*

Углекислые холодные и термальные минеральные воды широко распространены на территории Камчатского края. Большинство вод этого типа с низкой температурой (5–10 °С) разгружается в пределах крупных палеовулканических структур Срединного хребта. К ним относятся Ковавлинские, Филипповские, Облуковинские, Богдановичские, Эклеваемские и другие источники. Углекислые минеральные воды с более высокой температурой (в среднем 20–40 °С) преимущественно разгружаются у подножий действующих вулканов Восточного вулканического пояса: Налычевские, Нижне-Дзензурские, Карымские, Нижне-щипинские и др. Эти воды обладают бальнеологическими свойствами и могут рассматриваться как потенциально пригодные для промышленного освоения по ряду компонентов (бор, мышьяк, литий, рубидий, стронций и др.).

Пушинские источники углекислых вод находятся в тыловой вулканической зоне Восточного пояса, недалеко от древнего вулканического массива г. Оленья, разгружаются в узкой долине р. Правый Кашкан, одного из истоков р. Кашкан (бассейн р. Камчатка). Место разгрузки термальных вод располагается непосредственно в зоне сочленения Центрально-Камчатской депрессии и поднятия Валагинского хребта, в области резкого погружения мел-палеогенового фундамента. Долина р. Кашкан заложена по глубинному разлому северо-западного простирания на контакте меловых пород, слагающих Валагинский хребет, со среднемиоценовыми вулканогенными образованиями андезидацитового состава [1].

В докладе представлены результаты работ авторов разных лет в контексте изучения потенциала Пушинских источников для промышленного освоения и изучения бальнеологических свойств термальных вод.

Общее описание Пушинских источников. Разгрузка термальных вод сосредоточена вдоль р. Правый Кашкан, одного из истоков р. Кашкан (правый приток р. Камчатка). Основная группа выходов расположена на первой заболоченной надпойменной террасе правого берега, сложенной гравийно-галечными отложениями и перекрытой травертиновым плащом. Преобладающий тип проявлений — слабогазирующие водоемы-«ванны» диаметром 1–2 м и глубиной 0.5–1 м. Поверхность воды частично покрыта темно-зелеными

термофильными водорослями. На одном из выходов сохранились следы искусственного каптажа. Дебит отдельных источников не превышает 0.1 л/с. Весь сток термальных вод дренируется в реку несколькими небольшими ручьями. Максимальная измеренная температура составляет 38 °С (сентябрь 2023 г.).

На левом берегу реки, ниже по течению у подножия коренного склона, образующего практически вертикальный уступ, находится еще одна группа источников. Всего здесь зафиксировано десять выходов с малым расходом (<0.05 л/с) и температурой до 30 °С. Часть из них разгружается непосредственно в русло реки. Выход вод сопровождается осаждением бурых гидроокислов железа, что и позволяет их обнаруживать. Наиболее примечателен источник Жильный, вытекающий из трещины в кальцитовых жилах, секущих вмещающие породы. Это самый высокотемпературный выход в данной группе (29 °С) и один из наиболее минерализованных среди всех Пущинских источников (7.1 г/дм³).

На правом берегу реки, ниже основной группы, расположена нижняя группа более холодных ($T=18-24$ °С) источников. Она узкой полосой обрамляет крутой склон в 20 м от уреза воды. Сформированный источниками ручей дебитом 1.5 л/с стекает в основной водоток.

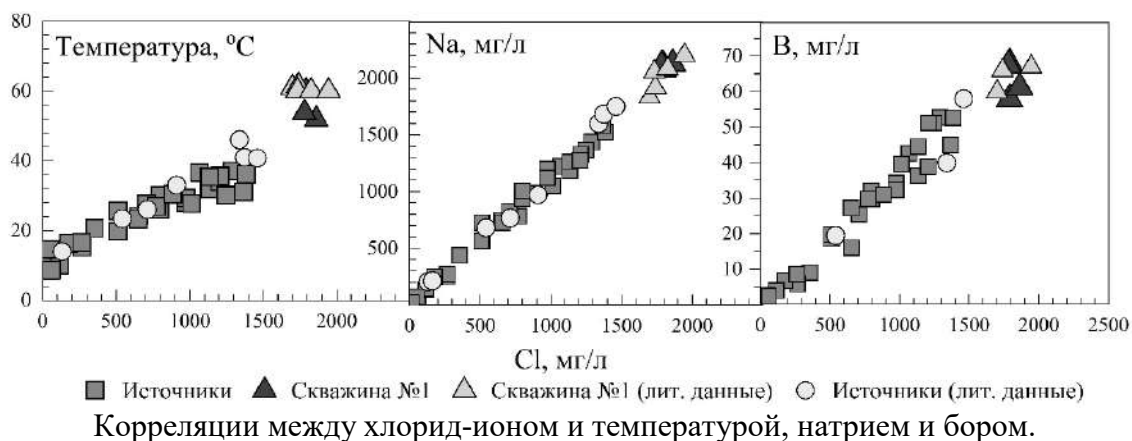
В ходе поисковых работ в начале 1980-х годов в районе источников было пробурено пять скважин. Две из них вскрыли с глубины 127–652 м слабощелочные Cl-HCO_3 термальные воды с температурой 55–70 °С [1]. В настоящее время используется только скважина № 1. Температура воды на устье составляет 65 °С. Вода по шлангу самоизливом поступает в открытый бассейн, оборудованный для купания. Прилегающая территория благоустроена: здесь находятся несколько небольших домиков туристического назначения, а также ряд более старых строений.

Краткая общегеографическая информация, дополненная фотоматериалом, а также гидрохимическая характеристика каждого из опробованных авторами в разные годы источников, включая физико-химические параметры (рН, температура и минерализация), тип вод и преобладающий газовый состав даны в открытой геоинформационной системе (ГИС) «Термоминеральные воды Курило-Камчатского региона» по адресу https://kamkursprings.nextgis.com/resource/28/display?angle=0&zoom=17&styles=380,299,353,15,62&base=basemap_0&lon=158.0452&lat=54.0498. Представленная ГИС разработана, поддерживается и пополняется Е.Г. Калачевой совместно со старшим научным сотрудником Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, к.ф.-м.н. А.А. Долгой.

Макрокомпонентный состав. Определение макрокомпонентов в пробах воды выполнялось в Аналитическом центре (ныне ЦКП «Камчатский центр элементного, минерального и изотопного анализа») и в лаборатории постмагматических процессов ИВиС ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский).

Проведенные анализы подтвердили ранее сделанный нами вывод о том, что все естественные выходы и воды, вскрытые скважинами, относятся к одному типу и имеют сходный химический и газовый состав. В целом это слабокислые или нейтральные (рН 6.0–7.3) гидрокарбонатно-хлоридные натриевые (Na-Cl-HCO_3) воды с температурой до 40 °С и минерализацией до 8 г/дм³, обогащенные бором (H_3BO_3 250–300 мг/дм³) и кремнеземом (H_4SiO_4 130–180 мг/дм³). В составе растворенных газов доминирует CO_2 (>95 об. %). Также в водах присутствуют бром (10–20 мг/дм³) и йод (0.6–1.1 мг/дм³) и повышены содержания ряда элементов, рассмотренные ниже по тексту.

В пределах исследованной площадки встречаются источники с более низкими значениями минерализации и температуры, что связано с разной степенью разбавления глубинных вод грунтовыми потоками в приповерхностных условиях (рисунок). На представленных графиках, кроме авторских, отражены данные из литературных источников [2, 3] и фондовых отчетов. Точки составов на графиках хорошо ложатся на линии смешения между двумя составляющими: поверхностными грунтовыми водами (низкие температуры и нулевые концентрации) и составом воды из скважины. Такое распределение характерно и для других макрокомпонентов по отношению к температуре и друг к другу.



Микроэлементы и промышленный потенциал. Микроэлементный анализ проб выполнен в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток).

Высокая общая минерализация вод Пущинских источников коррелирует с повышенным содержанием микроэлементов. Их суммарная концентрация (без учета компонентов с содержанием >1 мг/дм³) достигает 1.3 мг/дм³. Максимальные содержания закономерно отмечены в наиболее минерализованных пробах – из ист. Жильный и скважины № 1.

Для воды ист. Жильный характерно следующее распределение элементов по концентрациям (в скобках – содержание в мг/л или мкг/л): 1) >1 мг/л (макрокомпоненты): В (54), Fe (7.2), Sr (6.4), Li (4.3); 2) 0.1–0.5 мг/дм³: As (0.5), Rb (0.2), Cs (0.12), P (0.11), Ba (0.11); 3) 1–100 мкг/л (в порядке убывания): Mn, Ge, Al, Sb, Cu, Zn, Ni, Be; 4) <1 мкг/дм³: Pb, Ti, V, Se, Cr, Mo, Cd, Zr, Co, Tl, Te, Sn, Y, Sc, Ga, U, Ag, W, Bi, Hf, Th, Nb, Ta. Суммарное содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) составляет 0.133 мкг/дм³.

В термальной воде скважины № 1 распределение сходно: 1) >1 мг/дм³: В (60.8), Sr (7.5), Li (4.7), Fe (1.3); 2) 0.1–0.5 мг/дм³: Rb (0.25), As (0.14), Cs (0.13), P (0.11); 3) 1–100 мкг/дм³: Ba, Mn, Ge, Cu, Al, Pb, Cd, Zn, Ni, Cr; 4) <1 мкг/л: Se, Ti, V, Mo, Be, Co, Y, Zr, Te, Sc, Sn, Ga, Ag, W, Tl, U, Bi, Hf, Th, Nb, Ta. Суммарное содержание РЗЭ – 0.114 мкг/дм³.

Элементы, входящие в первую и вторую группу концентраций (Li, Rb, Cs, Sr, В), позволяют рассматривать воды Пущинских источников (как естественные выходы, так и вскрытые скважинами) в качестве перспективного гидроминерального сырья для извлечения редких щелочных металлов, бора и стронция.

Еще в начале 1980-х гг. Паратунской гидрогеологической экспедицией Камчатского производственного геологического управления в рамках опытно-методической работы «Прогнозная оценка эксплуатационных ресурсов подземных промышленных вод Камчатской области» была составлена карта прогнозных ресурсов масштаба 1:1 500 000. На этой карте район Пущинских источников был отнесен к числу наиболее перспективных для комплексного освоения по поликомпонентному признаку с возможностью извлечения Li, Rb, Cs, Sr, К и В.

Однако специализированные разведочные работы на месторождении так и не были выполнены. Впоследствии его эксплуатационные запасы были оценены как невысокие, а сам объект – как неперспективный. Исследования, проведенные в последние десятилетия в ИВиС ДВО РАН, свидетельствуют о том, что неудачное расположение разведочных профилей и скважин (вдоль русла р. Кашкан) не позволило вскрыть основной водоносный горизонт. Это указывает на необходимость проведения дополнительных изысканий и переоценки запасов термальных вод.

Важно отметить, что единственная результативная скважина № 1 находится в состоянии устойчивого самоизлива уже более 40 лет. На протяжении всего этого периода

физико-химические параметры и химический состав воды остаются стабильными, что подтверждает постоянство гидрогеодинамических условий в недрах.

Бальнеологические свойства. Несмотря на интерес со стороны местного населения и относительную доступность, детальное изучение бальнеологических свойств вод Пущинских источников до настоящего времени не проводилось.

По преобладающему газу воды относятся к углекислым, однако относительно низкое содержание свободного CO_2 ($200\text{--}330\text{ мг/дм}^3$) не позволяет классифицировать их как лечебно-столовые или лечебные минеральные воды в соответствии с действующими нормативами. По величине минерализации они могли бы быть отнесены к питьевым лечебно-столовым водам. Тем не менее высокие концентрации ряда элементов – бора ($50\text{--}60\text{ мг/дм}^3$), брома ($10\text{--}20\text{ мг/дм}^3$) и лития ($4\text{--}5\text{ мг/дм}^3$) – исключают возможность их бесконтрольного питьевого применения и ограничивают использование наружными бальнеологическими процедурами (термальные ванны).

Среди биологически активных компонентов бальнеологически значимые концентрации выявлены у метакремниевой кислоты, обладающей доказанным терапевтическим эффектом. Кремнистые термальные ванны показаны для лечения заболеваний суставов, последствий травм, патологий периферической нервной системы и кожных болезней. Этот тип вод широко распространен на Камчатке и активно используется, например, на Начикинском и Паратунском месторождениях.

Отдельного внимания заслуживает содержание брома, приближенное к бальнеологическим нормам. Бромные воды, применяемые как регулятор деятельности центральной нервной системы, являются редкими для региона, и Пущинские источники представляют в этом отношении уникальный объект.

Пущинские источники является очагом разгрузки долгоживущей гидротермальной системы. Они характеризуются разнообразными формами выходов с невысоким дебитом и однородным химическим составом. Наблюдаемые различия в температуре и минерализации вод отдельных источников связаны с разной степенью разбавления глубинных термальных вод холодными грунтовыми водами в приповерхностных условиях.

Пущинское месторождение термальных вод обладает значительным потенциалом в качестве источника гидроминерального сырья (редкие щелочные металлы, стронций, бор), однако для его промышленного освоения необходимы дополнительные разведочные работы.

Бальнеологические свойства вод изучены недостаточно. Высокие концентрации бора и других элементов исключают рекомендацию по использованию вод в качестве питьевых лечебно-столовых. В то же время их терапевтический эффект для наружного применения (термальные ванны) не вызывает сомнений. Однако, с учетом повышенной температуры воды и возможного наличия в испарениях токсичных соединений бора, избыток которых может негативно воздействовать на дыхательную и нервную системы, а также на желудочно-кишечный тракт, продолжительность приема процедур должна быть строго ограничена.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВиС ДВО РАН по теме «Роль гидротермальных систем Курило-Камчатской вулканической дуги в перераспределении мантийного и корового вещества, в процессах минералогенеза» (№ FWME-2024-0006).

Список литературы

1. Комплексные геофизические исследования геологического строения месторождений термальных вод Камчатки. Под редакцией В.М. Сугробова. М.: Наука, 1985. 112 с.
2. Лебедев В. Воды Юго-Восточной Камчатки. Часть II. Текущие воды. Приложения. 1919. Типография III Интернационала. С. 363–516.
3. Пийп Б.И. Термальные ключи Камчатки. М.: АН СССР, 1937. 268 с.

МИКРОКОМПОНЕНТЫ В ПЛАСТОВЫХ ВОДАХ СОЛЕНОСНЫХ РЕГИОНОВ ПРИКАСПИЙСКОЙ ВПАДИНЫ

Корзун А.В., Харитонов Н.А., Барановская Е.И.
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, tchenat@mail.ru

Аннотация. В статье представлены новые данные о содержании микрокомпонентов в подземных водах пяти водоносных горизонтов Прикаспийской впадины (четвертичный, неогеновый, верхнемеловый, сеноманский, триасовый и пермский). Выявлено, что концентрации ряда микрокомпонентов увеличиваются вниз по разрезу, часто превышая рекомендованные значения для отнесения к промышленным водам.

Ключевые слова: подземные воды, микрокомпоненты, рассолы

Abstract. This article presents new data on the microelement contents of groundwater from five aquifers in the Caspian Basin (Quaternary, Neogene, Upper Cretaceous-Cenomanian, Triassic, and Permian). It was found that the concentrations of some elements increase downstream, often exceeding recommended values for ore-bearing brines.

Keywords: groundwater, trace elements, brines

Прикаспийская впадина является крупнейшей на земном шаре областью развития солянокупольных структур. Она располагается на площади более 600 000 км², занимая краевое положение в пределах юго-восточной части Восточно-Европейской платформы. Характерной особенностью разреза впадины является наличие мощной соленосной толщи нижнепермского (кунгурского) возраста, разделяющей разрез на два структурно-формационных комплекса: подсолевой и надсолевой. На юге Прикаспийской впадины, в зоне тектонических нарушений, к кунгурским отложениям приурочены промышленные запасы калийных солей (сильвинитов). Здесь выделяют два основных структурных этажа: верхний – с относительно спокойно залегающими отложениями от четвертичного до нижнемелового возраста и нижний – с более древними и дислоцированными породами пермского, триасового и каменноугольного возраста. Для нижнего яруса характерно развитие локальных антиклинальных складок [1, 2].

Немногочисленными данными [3] показано, что рассолы солянокупольных структур на данной территории часто имеют различный макросостав и могут содержать повышенные концентрации бора, йода, стронция и рубидия, однако до сих пор широкий перечень микроэлементов не был изучен. В связи с этим основная цель работы заключалась в восполнении данного пробела и оценке распределения ряда микрокомпонентов в подземных водах обоих структурных этажей. Для выявления влияния соляных залежей на состав поверхностных вод был также изучен состав поверхностных вод мелких и крупных водотоков региона.

В основу исследования положены результаты опробования подземных и поверхностных вод региона, произведенного в течение полевого сезона 2024 г. Для выявления сезонных вариаций пробы отбирались трижды: в апреле, июне и сентябре. Было опробовано пять водоносных горизонтов (четвертичный, неогеновый, верхнемеловой, сеноманский, триасовый и пермский), а также озера и р. Аксай Курмоярский в двух точках. Пробы воды из скважин, не оборудованных насосом, отбирались пробоотборником. В эксплуатационных скважинах на неогеновый водоносный комплекс пробы отбирались из крана на устье скважин. Всего было проанализировано 77 водных образцов.

На месте отбора проводился сокращенный полевой анализ воды, включающий определение pH, электропроводности, HCO_3^- и физических свойств (температуры, цвета, запаха). Для определения нестабильных параметров использовались переносные тест-комплекты (фирмы HANNA и Эксперт). Пробы для анализа анионов фильтровались и собирались в полиэтиленовые пузырьки (без подкисления). Пробы для анализа катионов, сульфатов и металлов фильтровались через целлюлозный фильтр (0.45 мкм) на месте отбора для удаления взвеси и были подкислены азотной кислотой.

Для определения химических элементов и компонентов в водах использовался широкий спектр аналитического оборудования МГУ им. М.В. Ломоносова (в том числе фильтрационная установка ФЕС-2А) и аналитического центра ДВГИ ДВО РАН. Основные катионы и анионы определялись методом жидкостной ионной хроматографии (HPLC-10AVp, SHIMADZU) либо методом капиллярного электрофореза на приборе «КАПЕЛЬ-105М». Микро- и рассеянные элементы анализировались с использованием плазменно-оптической эмиссионной спектрометрии (ICP-AES, Plasmaquant-110) и индуктивной плазменной масс-спектропии (ICP-MS, Agilent 7700). Точность определения всех элементов была выше 7 % RSD.

Поверхностные воды. Минерализация (далее М) и химический состав поверхностных вод сильно вариативны. В прудах М меняется по сезонам и объектам опробования от 0.2 до 8.5 г/дм³, при среднем значении 3.5 г/дм³. М_{макс} выявлена осенью в прудах, не имеющих связи с подземными водоносными горизонтами, питающимися только за счет атмосферных осадков. Химический тип воды прудов хорошо коррелирует с их М, в водах с М более 3 г/дм³ преобладают ионы Na⁺, Cl⁻ и SO₄²⁻, тогда как в пресных водах – Ca²⁺ и HCO₃⁻. В водах пруда Осинный 1 выявлены ураганные содержания K⁺ (до 212.2 мг/дм³), что обусловлено, видимо, разгрузкой в него подземных вод, взаимодействующих с калийно-солевыми отложениями. Среднее значение K⁺ в поверхностных водах не превышает 4.1 мг/дм³.

По химическому составу воды прудов являются преимущественно сульфатно-хлоридными натриевыми, а воды р. Аксай являются сульфатно-хлоридными кальциево-натриевыми. В зависимости от места опробования состав реки может сильно варьироваться, на территории хутора Котельников выявлено высокое содержание SO₄²⁻ и Na⁺, в то время как вблизи пос. Нижние Черны основными ионами являются HCO₃⁻ и Ca²⁺.

Микрокомпонентный состав поверхностных вод весьма пестрый, воды прудов более обогащены микрокомпонентами в сравнении с водами реки. В прудах выявлены высокие концентрации бора (57–1566 мкг/дм³), алюминия (1.1–11.1 мг/дм³), марганца (74.3–751 мкг/дм³), бария (28–287 мкг/дм³) и титана (16.3–100 мкг/дм³).

Микрокомпонентный состав большинства поверхностных вод изучаемой территории, по всей видимости, формируется под воздействием техногенного фактора – концентрации микрокомпонентов значительно превышают их кларк в водах зоны гипергенеза [4] и ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения. В случае естественного формирования микрокомпонентного состава, как в пруду Северный Дальний, содержание микрокомпонентов незначительное.

Четвертичный водоносный горизонт (Q). М данных вод сильно варьируется от 0.9 до 15.5 г/дм³ в зависимости от скважины и сезона. Высокая минерализация формируется в засушливые сезоны при испарении воды и в скважинах, выводящих воду, контактирующую с солевыми комплексами. Так как воды данного горизонта часто высокоминерализованные, они не используются в питьевых целях. Значения pH изменяются от 5.1 до 8.4. Среди катионов во всех пробах преобладает Na⁺, в анионном составе – Cl⁻, иногда SO₄²⁻.

В целом, воды четвертичного комплекса имеют пестрый микрокомпонентный состав, содержание микроэлементов в них хаотично и подвержено сезонным (для одной скважины) и площадным вариациям (от локализации скважины). Относительно кларков элементов зоны гипергенеза выявлено превышение по В, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu и Sr, а относительно кларков элементов морской воды значительно повышены содержания по Mn, Fe, Co, Ni и Cu. Усредненный микрокомпонентный состав подземных вод рассматриваемого горизонта можно представить в виде следующего ряда от большего к меньшему (мкг/кг): Fe₁₆₁₀₇₆ > Si₆₈₀₉ > Sr₆₅₈₀ > Mn₄₈₈₁ > B₂₀₅₉ > Al₁₄₂ > Cu₉₃ > P₅₅ > Ba₄₃ > Ni₁₇ > Zn₁₃ > Co₇ > Ti_{3.5} > Cr₃ > Rb_{1.4} > As_{0.9} > V_{0.7} > U_{0.2}. Наибольшая вариативность по латерали в водах горизонта наблюдается по Si, Ti, V, Mn, Fe, Co, As и U. В целом, для данного водоносного комплекса нет зависимости между максимальными/минимальными концентрациями микрокомпонента и сезоном опробования.

Неогеновый водоносный горизонт (N₂). Воды горизонта активно используются местным населением в качестве питьевых и технических, их состав был изучен в пяти

скважинах. Как и в водах четвертичного водоносного горизонта М варьируется по сезонам, однако амплитуда изменений не превышает 0.20–1.95 г/дм³. Среднее значение показателя составляет 0.7 г/дм³. рН находится в диапазоне 6.5–10.1. Преобладают Na⁺ и Ca²⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, иногда SO₄²⁻. По химическому составу воды горизонта являются гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридными кальциево-натриевыми.

По микрокомпонентному составу это наиболее «бедный» водоносный горизонт среди рассматриваемых, концентрации микроэлементов низкие и близки к значению их кларков в подземных водах зоны гипергенеза. Значительное увеличение (~ в пять раз) наблюдается только по бору. Среднее значение элемента составляет 187 мкг/дм³, а диапазон вариативности 53.19–530 мкг/дм³. Повышенные содержания бора в водах горизонта обусловлены локальными особенностями водовмещающей толщи – повышенным количеством минералов концентраторов бора. Также превышен кларк по барии и стронцию. Повышенные концентрации этих элементов обусловлены растворением карбонатных и сульфатных минералов, концентрирующих барий и стронций. Несмотря на большой разброс значений микрокомпонентов в зависимости от скважины все выявленные концентрации укладываются в нормы, указанные в СанПин 1.2.3685-1 для питьевых вод.

Усредненный микрокомпонентный состав подземных вод этого горизонта выглядит как (мкг/кг): Si₇₈₂₅ > Sr₁₀₂₆ > B₁₈₀ > Fe₁₅₁ > Ba₅₀ > Al₄₃ > P₂₉ > Zn_{9.6} > Cr₉ > U_{6.7} > Cu₃ > Mo_{2.5} > Ti_{2.2} > Ni_{2.1} > Mn_{2.01} > V_{1.5} > Rb_{0.7}.

Сеноманский водоносный горизонт (K_{1s}). Минерализация вод горизонта стабильна, не подвержена сезонной вариативности: 9.0–9.4 г/дм³, с рН ≈ 11.2. В анионном составе Cl⁻ превышает HCO₃⁻ в 1.5 раза и в 10 раз больше, чем SO₄²⁻. Содержание HCO₃⁻ составляет 26 %-экв. Концентрация Cl⁻ меняется от 3309.2 мг/дм³ в весенний период до 3364.1 мг/дм³ в летний период, до 3430.9 мг/дм³ в осенний период. Основным катионом является Na⁺ 2908–2959 мг/дм³. По химическому составу воды горизонта – гидрокарбонатно-хлоридные натриевые.

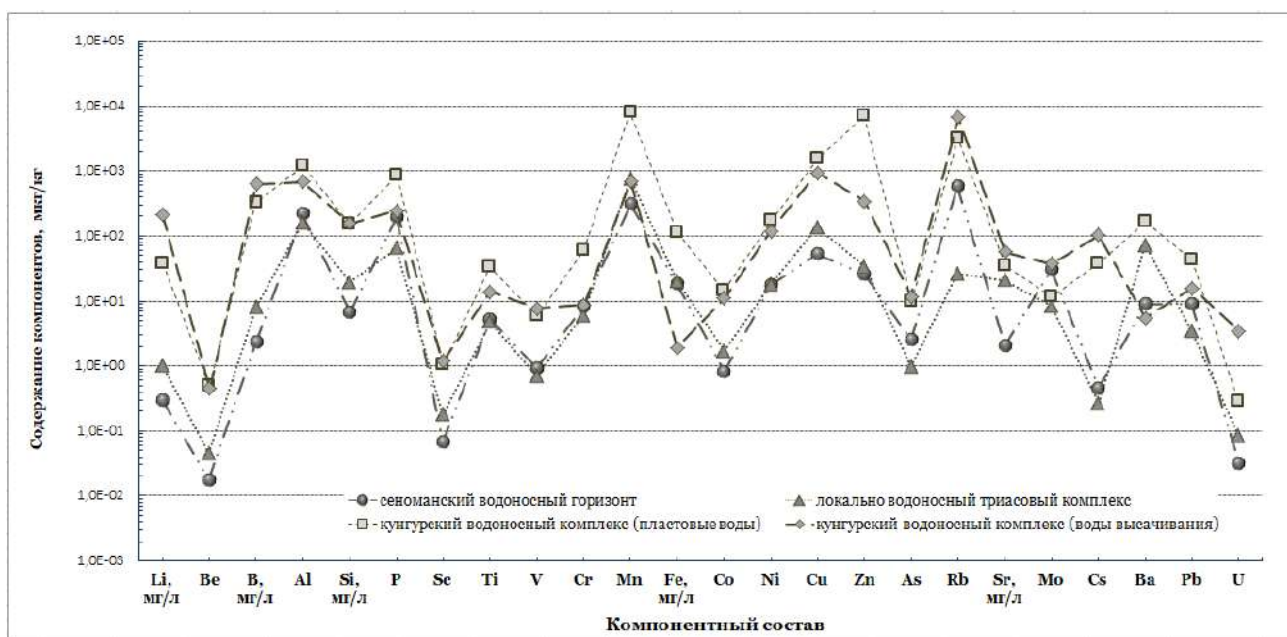
По сравнению с водами вышележащего комплекса в сеноманском горизонте наблюдается значительное увеличение (иногда на два порядка) содержаний практически всех изученных элементов, исключая Cr и U, концентрации которых понизились, что свидетельствует о переходе к зоне затрудненного водообмена. Не изменилось содержание Sc, Co и Sr. В целом, значительных колебаний микроэлементного состава вод горизонта от сезона опробования не наблюдается, за исключением Al, Sc, Mn, Co, Ba, Pb и Fe.

Далее представлен усредненный микрокомпонентный состав подземных вод горизонта (мкг/кг): Fe₁₈₁₉₉ > Si₆₆₅₆ > B₂₃₀₆ > Sr₂₀₃₅ > Rb₅₈₈ > Mn₃₁₁ > Al₂₁₈ > P₁₉₇ > Cu₅₃ > Mo₃₁ > Zn₂₆ > Ni₁₈ > Pb_{9.1} > Ba_{9.2} > Cr_{8.1} > Ti_{5.2} > As_{2.6} > V_{0.94} > Co_{0.8}.

Триасовый водоносный горизонт. Подземные воды горизонта соленые, значительно более минерализованные (более чем в четыре раза), чем воды сеноманского горизонта, 34.7–37.2 г/дм³ с рН 8.2–8.4. Химический состав воды отличается от вод вышележающих водоносных горизонтов, здесь наблюдается преобладание SO₄²⁻ над HCO₃⁻. Преобладающими ионами является Cl⁻ и Na⁺.

По сравнению с водами вышележающих водоносных комплексов наблюдается увеличение содержаний следующих компонентов: Be в три раза, В в четыре раза, Si в три раза, Sc в три раза, Fe незначительно, Co в два раза, Cu в два с половиной раза, Zn незначительно, Sr в десять раз, Ba в восемь раз, U незначительно (рисунок). В то же время содержания Al, P, Ti, V, Cr, Mn, Ni, As, Rb, Mo, Cs, Pb уменьшаются. Существенных сезонных изменений концентраций рассматриваемых микроэлементов не наблюдается, исключая Al, Mn, Fe, Zn, Pb и U.

Усредненный микрокомпонентный состав подземных вод водоносного триасового комплекса можно представить в виде следующего ряда от большего к меньшему (мкг/кг): Sr₂₀₆₀₈ > Fe₂₀₂₂₉ > Si₁₉₅₀₇ > B₈₀₅₀ > Mn₇₆₃ > Al₁₅₈ > Cu₁₃₃ > Ba₇₃ > P₆₅ > Zn₃₃ > Rb₂₆ > Ni₁₈ > Mo_{8.3} > Cr₆ > Ti_{4.7} > Pb_{3.5} > Co_{1.7} > As_{0.96} > V_{0.70} > Cs_{0.26}.



Распределение микрокомпонентов в подземных водах сеноманского, пермско-триасового и кунгурского водоносных горизонтов.

Пермский (кунгурский) комплекс (P1kg). Все опробованные воды горизонта являются крепкими рассолами (М варьируется от 309.3 до 334.2 г/дм³) с pH 5.5–8.5. Среди макрокомпонентов преобладают Na⁺ и Cl⁻, фиксируются высокие концентрации калия (среднее значение составляет 14.5 г/дм³). В подземных водах высачиваний средняя концентрация K⁺ достигает 25.1 г/дм³, а основными макрокомпонентами являются Mg²⁺ и Cl⁻. По химическому составу воды горизонта – хлоридные натриевые / хлоридные магниевые-натриевые.

В отличие от вышележащих горизонтов воды кунгурского комплекса содержат высокие концентрации многих микрокомпонентов (рисунок), часто они превышают рекомендованные значения для отнесения к промышленным водам. Однако воды горизонта по микрокомпонентному составу не единообразны, наблюдается значительное отличие содержаний ряда компонентов в подземных водах горизонта и в водах высачивания. В водах высачивания фиксируются значительно более высокие концентрации B, Ti и Rb. Усредненный микрокомпонентный состав вод высачивания выглядит следующим образом (мкг/кг): B₆₃₅₅₀₅ > Si₁₅₆₉₅₄ > Fe₁₉₀₁ > Cu₉₄₁ > Mn₆₉₇ > Al₆₈₈ > Zn₃₄₅ > P₂₄₆ > Ni₁₁₈ > Cs₁₀₂ > Mo₃₈ > Pb₁₆ > Ti₁₄ > As₁₂ > Co₁₁ > Cr_{8.7} > V_{7.6} > Ba_{5.5} > U_{3.5} > Sc_{1.2} > Be_{0.5}.

В районе исследования наблюдается характерная вертикальная зональность: с глубиной наблюдается резкое увеличение содержаний ряда растворенных микрокомпонентов. В подземных водах кунгурского комплекса выявлены высокие содержания лития, бора, рубидия, стронция и цезия. По первым трем элементам воды превышают промышленные концентрации и могут быть рекомендованы для использования в качестве гидроминерального сырья. Содержания стронция и цезия высокие, но не достигают промышленных показателей.

Список литературы

1. Ахлестина Е.Ф., Московский Г.А. Надсолевые мезозойско-кайнозойские отложения Гремячинского месторождения калийных солей // Известия Саратовского университета, Серия: Науки о Земле. 2008. Т. 8(2). С. 50–55.
2. Свидзинский С.А., Музалевский М.М., Ковальский Ф.И. Гремячинское месторождение сильвинитов // Новые данные по геологии соленосных бассейнов Советского Союза. М., 1986. С. 204–219.
3. Ткаченко А.И., Козлова Д.Ф. Особенности формирования состава рапы межсолевых линз // Геология нефти и газа. 1987. № 8. С.37–38.
4. Шварцев С.Л. Основы гидрогеологии: Гидрогеохимия. Новосибирск: Наука, 1982. 287 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕЦИАЛЬНОГО ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД КАМЧАТКИ

Котович А.Д.¹, Спектор С.В.²

¹ФГБУ «Гидроспецгеология», Москва, kotovich@geomonitoring.ru

²АО «ГИДЭК», Москва

Аннотация. Обоснованы основные принципы и методы создания специализированного комплекта карт теплоэнергетических подземных вод территории РФ на основе гидрогеологического районирования. На примере Камчатки показана реализация принципов и методов специального гидрогеологического районирования и представлены его основные результаты.

Ключевые слова: теплоэнергетические подземные воды, карта специального гидрогеологического районирования, принципы специального гидрогеологического районирования

Abstract. The basic principles and methods of drawing up a specialized set of maps of thermal energy groundwater in the territory of the Russian Federation based on hydrogeological zoning are substantiated. Using the example of Kamchatka, the implementation of the principles and methods of special hydrogeological zoning is shown and its main results are presented.

Keywords: thermal energy groundwater, map of special hydrogeological zoning, principles of special hydrogeological zoning

В последние годы в России возрос интерес к изучению и использованию геотермальных ресурсов по причинам, связанным как с экономическими, так и с экологическими факторами. Россия обладает значительными геотермальными ресурсами, особенно на Камчатке, Курильских островах, Северном Кавказе, в районе Байкальского рифта, в Западной Сибири. Развитие геотермальной энергетики позволяет снизить зависимость от традиционных видов топлива (углеводородов) и создать дополнительные источники энергии, что особенно важно для удаленных и изолированных регионов, которые зависят от дорогостоящего завоза углеводородного топлива. Развитие технологий позволяет повысить эффективность использования низкотемпературных геотермальных ресурсов и расширяет возможности применения геотермальной энергии, включая регионы, где ранее ее использование считалось нецелесообразным. В последнее время также совершенствуются методы попутного извлечения полезных компонентов (например, лития) из термальных вод, что добавляет экономической привлекательности проектам.

В рамках «Энергетической стратегии России до 2035 года» и других программ уделяется внимание развитию возобновляемых источников энергии, включая геотермальную. Планируются инвестиции в исследования, разработку технологий и реализацию пилотных проектов, например, в Сибири, на Кавказе и Дальнем Востоке.

В связи с вышеизложенным тема разработки комплекта специализированных карт теплоэнергетических подземных вод (ТЭПВ) России, который позволит оценить ресурсы ТЭПВ и перспективность их использования, становится особенно актуальной.

Наиболее содержательные работы по созданию карт термальных вод были проведены в 1980-х гг. [1]. В 2008 г. ВСЕГИНГЕО была составлена Карта термальных вод территории РФ (в рамках работы [2]), на основе карт из Атласа [1]. За более чем 40 лет, прошедших после создания «Атласа карт ресурсов термальных вод СССР», появилось много новых данных о геотермических условиях территории РФ: в разных регионах пробурены глубокие скважины, разведаны новые месторождения ТЭПВ, изучены и опробованы десятки термопроявлений. Кроме того, создана карта гидрогеологического районирования РФ [3] масштаба 1:2 500 000, на которой выделены гидрогеологические структуры 1–3-го порядка.

Цель наших работ – на основе общего гидрогеологического районирования РФ и всего имеющегося фактического материала о геотермических условиях территории РФ создать современный комплект карт ТЭПВ, включающих карту специального гидрогеологического районирования ТЭПВ, карту использования ТЭПВ, карту прогнозных ресурсов и перспектив использования ТЭПВ. Карта специального гидрогеологического

районирования ТЭПВ создается в этом ряду первой и является основой для создания последующих карт. Предусматривается, что вышеуказанный комплект карт будет являться картографической и фактографической основой для управления фондом недр и лицензирования недропользования в части ТЭПВ. За основу специального районирования ТЭПВ принимается карта общего гидрогеологического районирования [3].

Гидрогеологические структуры на карте районирования ТЭПВ охарактеризованы фактическим материалом – термопроявлениями (их дебитом и температурой), скважинами (разрез, температура, минерализация) и вулканами (активные, неактивные). Термопроявления и скважины систематизированы в виде каталогов с координатами, гидрогеологическими и геотермическими характеристиками. В пояснительной записке к карте районирования ТЭПВ на основе фактического материала для гидрогеологических структур будет дана характеристика, позволяющая в дальнейшем оценить перспективность этой структуры и ресурсы ТЭПВ.

Основным принципом составления карты специального гидрогеологического районирования ТЭПВ является типизация гидрогеологических структур по характеру распространения и условиям залегания термальных вод. По характеру распространения и условиям залегания термальных вод выделяются два типа водонапорных систем: пластовый и трещинный, в том числе трещинно-жильный.

По геотермическим условиям и интенсивности геотемпературных полей водонапорные системы пластового типа подразделяются на два вида:

1) системы древних платформ и сочлененных с ними краевых прогибов, межгорные впадины, выполненные палеозойскими породами, в основании осадочного чехла которых максимальная температура достигает 50–75 °С, реже – 100 °С;

2) системы эпипалеозойских плит и сочлененных с ними краевых прогибов, межгорные впадины, выполненные мезокайнозойскими породами, где в основании осадочного чехла максимальная температура достигает 100–200 °С, реже более.

В пределах водонапорных систем трещинного и трещинно-жильного типа выделяются четыре основных типа геологических обстановок, влияющих на температуру и формирование состава термальных вод:

1) области кайнозойской складчатости в районах современного вулканизма, в основном сложенные вулканогенно-осадочными породами кайнозоя (температура в геотермальных системах до 300 °С и более);

2) области кайнозойской складчатости, вне районов современного вулканизма, в основном сложенные осадочными и вулканогенно-осадочными породами кайнозоя и мезозоя (температура на глубине до 3 км достигает 150 °С);

3) области и районы мезозойской и более древней складчатости, в основном сложенные изверженными и метаморфизованными породами мезозоя, палеозоя и докембрия, в которых проявилась кайнозойская тектоническая активизация и вулканизм (температура до 100 °С);

4) области и районы древней (домезозойской) складчатости, в основном сложенные изверженными и сильно метаморфизованными породами палеозоя и докембрия (температура до 40 °С).

В качестве основного показателя, характеризующего термальные воды как теплоэнергетические, применяется их температура. Для картирования принята следующая градация подземных вод по температуре, в зависимости от их целевого использования в качестве теплоэнергетических подземных вод (следует отметить, что значения температуры могут существенно меняться в разных географо-экономических и климатических условиях):

- <20 °С – условно холодные воды;
- 20–40 °С – субтермальные воды, которые могут использоваться в качестве ТЭПВ при применении тепловых насосов;
- 40–70 °С – термальные воды, которые могут использоваться в рекреационных целях и в качестве ТЭПВ для отопления отдельных зданий и сооружений;

- 70–100 °С – термальные воды, которые могут использоваться в качестве ТЭПВ для систем теплоснабжения локальных селитебных зон;
- >100 °С – термальные воды, которые могут использоваться в качестве ТЭПВ для систем теплоснабжения и выработки электроэнергии с применением бинарных технологий.

В районах современного вулканизма дополнительно выделяются:

- 100–200 °С – перегретые термальные воды, которые могут использоваться в качестве ТЭПВ для систем теплоснабжения и выработки электроэнергии;
- >200 °С – перегретые термальные воды, которые могут использоваться для выработки электроэнергии на энергоустановках прямого цикла.

При картировании учитываются подземные воды до глубины 3000 м, как доступные для практического освоения.

Создание карты специального гидрогеологического районирования ТЭПВ началось с Корякско-Камчатской сложной гидрогеологической складчатой области (п-ов Камчатка), как наиболее перспективной территории для освоения высокотемпературных геотермальных ресурсов и наиболее нагруженной фактическими материалами.

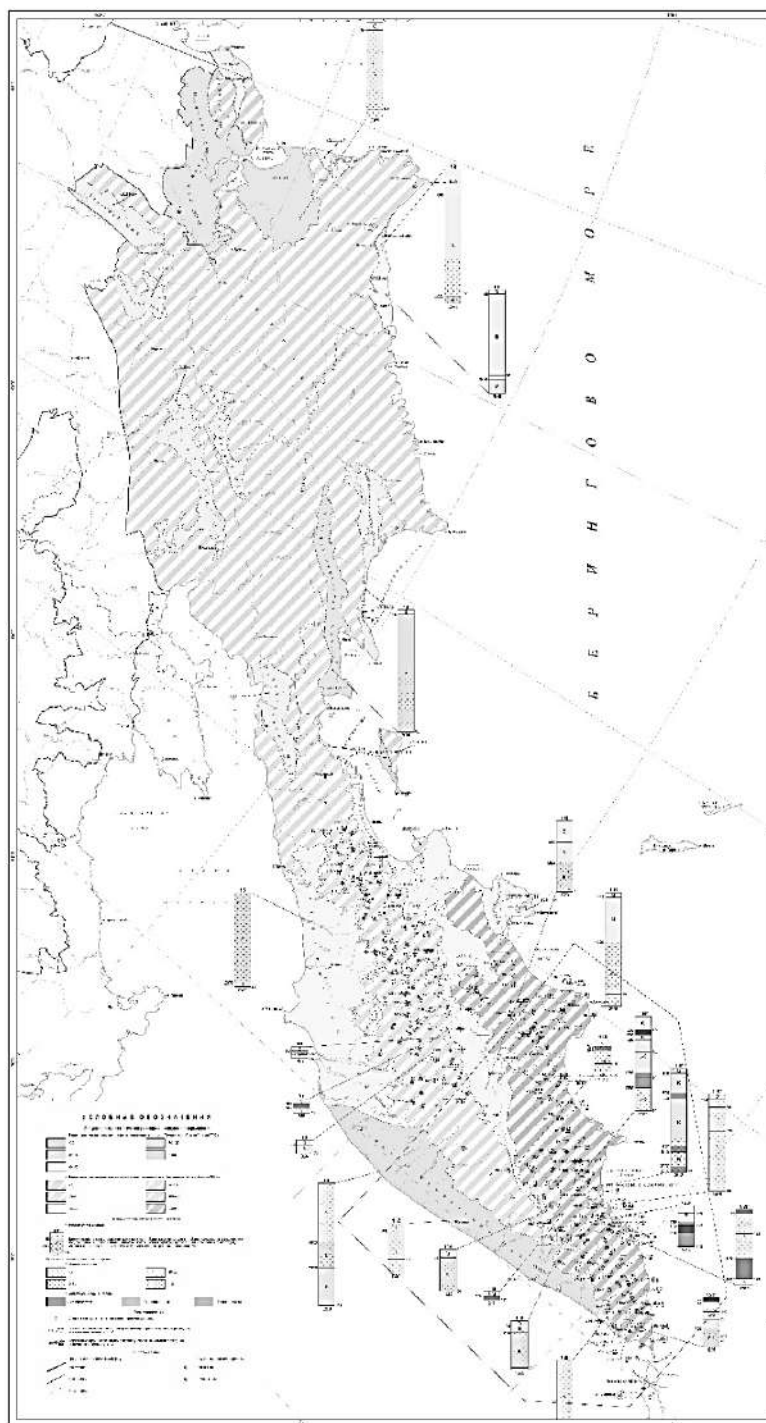
На предварительной карте специального гидрогеологического районирования ТЭПВ Камчатки (рисунок) показаны:

- геолого-структурные условия формирования ТЭПВ: разным типом заливки показаны пластовые либо трещинно-жильные подземные воды, цветом – температура;
- гидрогеотермический разрез скважин – после анализа нескольких сотен скважин было отобрано и занесено в каталог опорных скважин 23 наиболее информативных скважины. К каждой скважине построена колонка, на которой отображается глубина залегания подошвы стратиграфического подразделения, геологический индекс, цвет соответствует стратиграфическому подразделению, крап – минерализации. Показаны также глубина измерения температуры и ее величина;
- термопроявления – термальные источники и парогазовые струи с номером по каталогу, расходом и температурой. Всего на карту вынесено порядка 150 термопроявлений;
- активные и неактивные вулканы;
- границы гидрогеологических структур первого, второго и третьего порядка.

Для детального отображения картируемых объектов на перегруженных информацией участках карты 1:2 500 000 сделана карта-врезка масштаба 1:1 000 000.

В пределах Корякско-Камчатской сложной гидрогеологической складчатой области наиболее высокая температура термальных вод (>200 °С) наблюдается в пределах Восточно-Камчатского гидрогеологического массива, где находится большая часть месторождений ТЭПВ. Термальные воды, которые могут использоваться в качестве ТЭПВ для систем теплоснабжения локальных селитебных зон (с температурой 70–100 °С) распространены также в Срединно-Камчатском гидрогеологическом массиве.

Межгорные и предгорные артезианские бассейны относятся к менее перспективным гидрогеологическим структурам. Максимальную температуру (>100 °С) вскрыли скважины только в пределах Западно-Камчатского предгорного артезианского бассейна, на глубинах близких к 3000 м. Нижнеанадырский и Западно-Олюторский межгорные артезианские бассейны относятся к гидрогеологическим структурам с теплоэнергетическими подземными водами, имеющими температуру 70–100 °С. Наименее перспективными гидрогеологическими структурами являются Кинкильский предгорный артезианский бассейн, Центральнo-Камчатский, Литкенский, Озерный и Усть-Камчатский межгорные артезианские бассейны с температурой теплоэнергетических подземных вод 40–70 °С. К неперспективным гидрогеологическим структурам для поисков ТЭПВ относятся Корякский гидрогеологический массив, некоторые межгорные артезианские бассейны, входящие в Корякско-Анадырскую гидрогеологическую складчатую область, а также Ганальский горный массив протерозойских пород, который выделяется на юге Срединно-Камчатского гидрогеологического массива.



Карта специального гидрогеологического районирования теплоэнергетических подземных вод Камчатки.

Список литературы

1. Куликов Г.В., Маврицкий Б.Ф., Атлас карт ресурсов термальных вод СССР. Ленинград: ВСЕГЕИ, 1984.
2. Куренной В.В., Соколовский Л.Г., Голицын М.С. и др. Создание гидрогеологической карты Российской Федерации масштаба 1:2 500 000. Госконтракт №АЛ-02-06/40. ФГУП «ВСЕГИНГЕО». 2008.
3. Пугач С.Л. и др. Карта гидрогеологического районирования территории Российской Федерации масштаба 1:2 500 000 (для ведения мониторинга подземных водных объектов) и унифицированные схемы объектов гидрогеологической стратификации территории Российской Федерации (артезианских бассейнов). М.: ФГУГП «Гидроспецгеология», 2011.

СОРБЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЛИТИЯ ИЗ РАССОЛОВ НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Монхороева Л.М., Филатова Е.Г., Зелинская Е.В.

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск,
lubamon071299@gmail.com*

Аннотация. В работе показана возможность извлечения ионов лития из пластовых рассолов с использованием сорбента $\text{LiCl} \cdot 2\text{Al}(\text{OH})_3$. Обменная емкость сорбционного материала составила 3.42 ± 0.03 мг/г при pH среды 6.0–6.6, температуре 25 °С, соотношении твердой и жидкой фазы (Т:Ж) = 1:100, скорости перемешивания 350 об/мин, времени контакта фаз 3 ч.

Ключевые слова: адсорбция, природные рассолы, ионы лития

Abstract. The paper shows the possibility of extracting lithium ions from reservoir brines using a sorbent $\text{LiCl} \cdot 2\text{Al}(\text{OH})_3$. The exchange capacity of the sorption material was 3.42 ± 0.03 mg/g at a pH of 6.0 – 6.6, temperature 25 °C, ratio of solid and liquid phases (T:G): 1:100, mixing speed: 350 rpm, phase contact time: 3 hours.

Keywords: adsorption, natural brines, lithium ions

Литий, широко применяемый в различных высокотехнологичных отраслях, является критическим элементом для производства современных аккумуляторов, используемых в электромобилях, портативной электронике и системах хранения энергии. С увеличением мирового спроса на литий, обусловленного переходом к экологически чистым источникам энергии и ростом числа электромобилей, особую значимость приобрела разработка устойчивых и эффективных методов его добычи и переработки. Традиционные методы, такие как добыча из литиевых рудников и солончаков, сопряжены с высокими экологическими рисками: загрязнением водных ресурсов, разрушением экосистем и значительными выбросами углерода. Литий из пластовых рассолов на сегодняшний день преимущественно получают экстракцией, сорбционными методами и осаждением на гидроксид алюминия, а также диализа [10], ионного обмена и мембранного разделения [11]. В качестве наиболее перспективного источника гидроминерального ресурса лития в Российской Федерации можно выделить глубинные рассолы Ангаро-Ленского бассейна. Формирование и уникальный химический состав этих сверхкрепких рассолов детально описаны в фундаментальных трудах Е.В. Пиннекера, который классифицировал их как ценное минеральное сырье [5]. Исследования И.С. Ломоносова [3] и А.А. Дзюбы [1] позволили выявить закономерности распространения и разгрузки подземных вод Сибирской платформы, среди которых выделяются рассолы месторождений: Знаменского, Верхнечонского, Ярактинского и др. [2, 4]. Высокая минерализация исследуемых рассолов и значительное содержание ионов кальция и магния обуславливают необходимость применения селективных методов извлечения лития, среди которых для комплексной переработки геотермальных рассолов наиболее перспективны сорбционные способы [9].

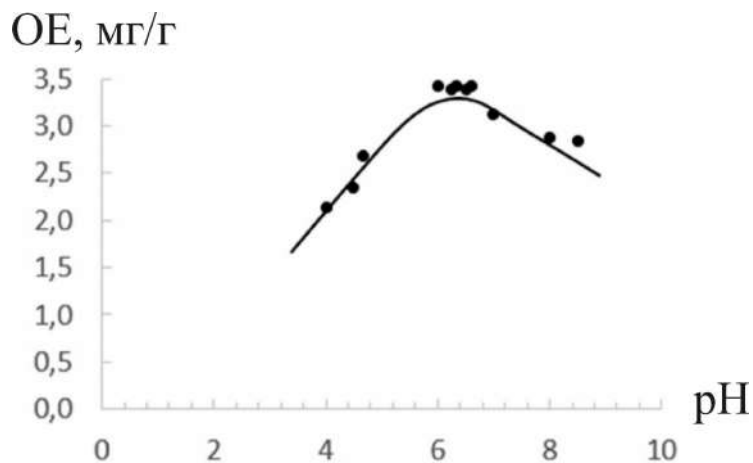
Цель работы: отработка оптимальных условий извлечения ионов лития из пластовых рассолов сорбентом, представляющим собой хлорсодержащую разновидность двойного гидроксида алюминия и лития. Известны патенты на способы синтеза сорбентов на основе гидроксида алюминия из LiCl и $\text{Al}(\text{OH})_3$, однако их масштабное промышленное производство затруднено из-за отсутствия надежных высокопроизводительных активаторов планетарного или центробежного действия [6–8]. В работе в качестве сорбента использовали хлорсодержащую разновидность двойного гидроксида алюминия и лития – $\text{LiCl} \cdot 2\text{Al}(\text{OH})_3$.

Отработку оптимальных условий извлечения ионов лития проводили на модельных растворах. Для их приготовления использовали хлорид лития $\text{LiCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$ (хч) и дистиллированную воду. Обменную емкость рассчитывали по формуле:

$$\text{ОЕ} = \frac{C_0 - C_{\text{кон}}}{m} \cdot V,$$

где C_0 и $C_{\text{кон}}$ – начальная и равновесная концентрации ионов Li^+ в растворе мг/дм^3 ; V – объем раствора, дм^3 ; m – масса сорбента, г. Начальная концентрация ионов Li^+ составила 140 мг/дм^3 . Объем раствора – 100 дм^3 ; масса навески – 1 г.

Известно, что на адсорбционное извлечение ценных компонентов большое влияние оказывает кислотность среды [11]. В работе исследовано влияние pH на адсорбцию ионов лития, полученные результаты представлены на рисунке.



Влияние pH на сорбцию ионов лития.

Подщелачивание рассола до $\text{pH}=6\text{--}6,6$ приводит к повышению величины сорбции на 60 %. В интервале pH 6–6,6 обменная емкость составляет $3,42 \pm 0,03 \text{ мг/г}$. При увеличении температуры остаточная концентрация ионов лития при сорбции увеличивается, а обменная емкость уменьшается, что подтверждает экзотермичность процесса (таблица).

Влияние температуры на извлечение ионов лития и обменную емкость

N	Температура рассола, °C	$C(\text{Li}^+)$ после сорбции, мг/дм^3	ОЕ, мг/г
1	15	103,8	$3,62 \pm 0,03$
2	25	105,8	$3,42 \pm 0,03$
3	45	116,1	$2,39 \pm 0,03$

Величина обменной емкости хлорсодержащего двойного гидроксида лития – алюминия состава $\text{LiCl} \cdot 2\text{Al}(\text{OH})_3$ – достигает $3,42 \pm 0,03 \text{ мг/г}$ в следующих условиях: значение pH среды 6,0–6,6, температура 25 °C, соотношение твердой и жидкой фазы (Т:Ж) = 1:100, скорость перемешивания 350 об/мин, время контакта фаз 3 ч.

Оптимальные условия извлечения лития, определенные для модельного раствора, были применены к реальному рассолу нефтегазоконденсатного месторождения, расположенного в южной части Сибирской геологической платформы. Объектом работ являлись подземные воды, отобранные из рассолонасыщенной зоны галогенно-карбонатной гидрогеологической формации усольской свиты, залегающие выше продуктивных пластов парфеновского горизонта. Таким образом, экспериментально подтверждена принципиальная возможность и эффективность применения сорбента $\text{LiCl} \cdot 2\text{Al}(\text{OH})_3$ для извлечения ионов лития из пластовых рассолов в ранее установленных оптимальных условиях.

Список литературы

1. Дзюба А. А. Разгрузка рассолов Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1984. 153 с.
2. Зелинская Е.В., Филатова Е.Г., Хамаганова А.Ю., Каненкин Е.И. Исследование процессов извлечения ионов лития из предельно насыщенных пластовых рассолов // Обогащение руд. 2024. № 1 С. 10–15.
3. Ломоносов И.С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука, 1974, 159 с.

4. Мелентьев Г.Б., Делицын Л.М. Литий России – стратегический компонент новой энергетики: проблемы и перспективы промышленного производства // Материалы международной научно-практической конференции. «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2021». Севастополь. 2021. С. 680–686.
5. Пиннекер Е.В. Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна: закономерности размещения, состав, динамика, формирование и использование. М.: Наука, 1966. 331 с.
6. Способ получения алюмината лития. Пат. 2113405 РФ. МПК6 C01F 7/04, C01D 15/00. / Н.П. Коцупало, Л.Т. Менжерес, В.И. Титаренко, А.Д. Рябцев. Заявл. 09.07.97. Оpubл. 10.10.2000. Бюлл. № 28.
7. Способ получения кристаллического алюмината. Пат. 2089500 РФ. МПК6 C01F 7/04, C01D 15/00. / Л.Т. Менжерес, Н.П. Коцупало. Заявл. 08.12.94. Оpubл. 10.09.97. Бюлл. № 25.
8. Способ сорбционного извлечения лития из литийсодержащих рассолов. Пат. 2 720 420(13)С1 РФ. МПК6 C01D 15/04, C02F 1/28, B01D 15/04, B01D 24/16. / Р.З. Сахабутдинов, Ф.Р. Губайдулин, Л.В. Кудряшова, Е.Ю. Звездин, Е.С. Буслаев. Заявл. 06.05.2019. Оpubл. 29.04.2020. Бюлл. № 13.
9. Fixed-bed column studies on the removal of copper using chitosan immobilized on bentonite / С. М. Futralan, С.-С. Kan, М. L. Dalida, С. P. L. Rivas, М.-W. Wan // Carbohydrate Polymers. 2011. Vol. 83. P. 697–704. URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.08.043> (дата обращения: 26.01.2026).
10. The recovery and separation of lithium by using solvent extraction methods / Т. Kanagasundaram, О. Murphy, М. N. Haji, J. J. Wilson // Coordination Chemistry Reviews. 2024. Vol. 509. P. 215727. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.215727> (дата обращения: 26.01.2026).
11. Tsuyoshi H. Innovative lithium recovery technique from seawater by using world-first dialysis with a lithium ionic superconductor // Desalination. 2015. Vol. 359. P. 59–63. URL: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.018> (дата обращения: 26.01.2026).

СУЛЬФИДНЫЕ ВОДЫ ТУВЫ

Оргильянов А.И.¹, Крюкова И.Г.¹, Аракчаа К.Д.², Пыряев А.Н.^{3,4}, Бадминов П.С.¹,
Сметанина И.В.⁵

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, irig@crust.irk.ru

²НИИ медико-социальных проблем и управления Республики Тыва, Кызыл, chodura@mail.ru

³Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск

⁴Новосибирский государственный университет, Новосибирск

⁵Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

Аннотация. В статье рассматриваются условия формирования сульфидных вод Тувы. Здесь выделяются два гидроминеральных района с развитием таких вод в нагорье Сангилен и в долине р. Элегест. Установлено, что основным механизмом генезиса сероводорода является биохимическое восстановление сульфатов бактериями. Источником органического вещества, необходимого для питания этих микроорганизмов, являются вмещающие горные породы. Подчеркивается, что, несмотря на относительно невысокие содержания сероводорода, изучаемые воды имеют высокую бальнеологическую ценность и используются для лечения различных заболеваний.

Ключевые слова: сероводородные воды, аржааны, гидроминеральный район, сульфатредукция, бальнеологическое применение

Abstract. In this article the conditions of formation of sulphide waters in Tuva are considered. There are two hydromineral regions with extention of such kind of waters: at the Sangilen mountains and in the valley of Elegest river. The main mechanism of hydrosulphide generation is the biochemical reduction of sulphates by bacteria is established. The source of organic matter, which is necessary for the feeding of this microorganisms is the contained rocks. Although relatively small content of hydrosulphide, this waters have high balneological value and are using for treatment of different diseases.

Keywords: hydrosulphide waters, arjaans, gydromineral region, sulphatereduction, balneologycal application

Территория Тувы богата проявлениями минеральных вод различных типов, одним из которых являются сульфидные (сероводородные) воды. К ним относятся воды, в составе которых присутствует сера в восстановленной форме, которая в зависимости от величины pH может существовать в виде свободного молекулярного сероводорода (H_2S), гидросульфид-иона (HS^-), сульфид-иона (S^{2-}). Такие воды имеют большую бальнеологическую ценность.

Сероводородные воды распространены в основном в восточной части Тувы (рисунок) и представлены азотными термами Уш-Бельдир, Тарыс и Маймалыш, а также рядом холодных источников, основная часть которых локализована в пределах нагорья Сангилен:



Местоположение изученных сульфидных вод Тувы.

Проявления сульфидных вод: 1 – термальные, 2 – холодные, 3 – границы гидроминеральных районов.

Алдын-Уургай, Бояй, и субтермальным источником Пош-Тэй, пользующимися большой популярностью у местного населения [5]. Кроме этих источников, в пределах нагорья Сангилен, по данным [2], имеется проявление сероводородных вод Терхе, в котором присутствие H_2S было определено только органолептически. Сероводородные воды связаны здесь с протерозойскими мраморами, на контакте которых с современными осадочными отложениями происходит разгрузка минеральных источников. На основании имеющейся информации в пределах нагорья Сангилен выделен своеобразный гидроминеральный район с распространением сульфидных вод.

Кроме того, результаты исследований последних лет указывают на существование другого гидроминерального района в нижней части долины р. Элегест, левого притока р. Улуг-Хем. В тектоническом отношении он представляет собой Элегестскую мульду округлой формы, являющуюся частью Тувинской котловины с низкорным пологохолмистым рельефом. Сложена эта мульда породами эрбекской и салдамской свит средней и верхней юры, представленными песчаниками, алевролитами, аргиллитами. Здесь находится Элегестское месторождение каменных углей. Эти угли относятся к гумусовым, малосернистым, малофосфористым [1]. В этом гидроминеральном районе закартировано четыре проявления сероводородных вод: две самоизливающие скважины – Большая и Малая Кочетовские (глубина ≈ 150 м); скважина, глубиной 25 м на конной базе духового общества Тувы и источник Доозун-аржаан, имеющий три выхода на расстоянии 10 и 30 м друг от друга. С юрскими угленосными отложениями связаны также воды, вскрытые скважиной Айжо (глубина 150 м), расположенной $\approx$ в 30 км к северо-востоку от устья р. Элегест. При бурении скважин на других участках долины р. Элегест с большой вероятностью также могут быть вскрыты сульфидные воды.

Ионный состав изученных вод довольно разнообразен (таблица), что отражает различие условий формирования конкретных проявлений сульфидных вод. Все эти источники характеризуются отрицательными значениями E_h , а также высокой концентрацией растворенного гелия. Последнее указывает на их связь с глубокими разломами. Вода этих водопунктов имеет метеорное происхождение, о чем свидетельствуют значения δD и $\delta^{18}O$ для пяти опробованных проявлений.

В настоящее время рассматриваются две основные гипотезы генерации сероводорода:

- абиогенная (термохимическое восстановление сульфатов, выделение сероводорода в составе вулканических газов при извержениях);
- биогенная (деятельность сульфатредуцирующих бактерий).

Абиогенный генезис сульфидов может осуществляться в азотных термальных источниках, где на глубине формирования этих вод вероятны высокие температуры среды. Однако для основной части исследуемой территории наиболее предпочтительной является гипотеза о генерации сероводорода за счет процесса сульфатредукции, протекающего с биохимическим окислением содержащегося в горных породах органического вещества [4]. Не менее важным условием для биохимической генерации сероводорода является присутствие в растворе сульфатов, источником которых также являются вмещающие породы. Исследования Н.Г. Наливайко [5] показали, что в воде источников Алдын-Уургай, Бояй и Пош-Тэй (Сангилен) присутствуют сульфат-восстанавливающие бактерии, генерирующие сероводород из сульфатов, а также тионовые бактерии, окисляющие H_2S . Процессы микробиологического восстановления сульфатов и окисления появляющихся сульфидов протекают одновременно и находятся в динамическом равновесии. Необходимые для питания микроорганизмов органические вещества входят в состав битумов, содержащихся в карбонатных породах, залегающих в местах разгрузки аржаанов. Формирование сульфидных вод в долине р. Элегест происходит по механизму, рассмотренному для Прииркутской впадины в работе [6]. В нашем случае воды, содержащие в своем составе SO_4^{2-} , также встречают на своем пути среду, богатую органическим веществом (уголь) и происходит восстановление сульфатов до сероводорода (гидросульфида).

Состав сульфидных вод Тувы

№ на карте	Водопункты	Координаты	Дата обследования	t воды, °C	pH	Eh, мВ	мг/дм³											He, мл/дм³	Изотопный состав (SMOW), ‰		
							K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	F ⁻	H ₄ SiO ₄	H ₂ S+HS ⁻		M	δD	δ ¹⁸ O
																		Термальные воды			
1	Уш-Бельдир, скважина 10РЭ	51°28,255' 98°03,192'	12.07. 2016	79.4	9.45	-374	3.2	100.9	0.6	<0.1	95.2	18.6	2.1	40.8	12.5	300	6.33	597.9	1.42X10 ⁻³	-	-
2	Маймалыш, источник, основн. выход	51°41,035' 97°23,905'	12.07. 2017	38.3	8.85	-	3.3	70.4	2.4	0.2	83.0	4.2	35.5	13.5	25.6	45	<0.10	283.1	7.91X10 ⁻³	-	-
3	Тарыс, источник, выход №14	50°22,420' 98°11,837'	01.07. 2025	48	9.4	-256	5.3	137.9	3.4	<0.4	71.4	8.7	200.8	12.1	12.0	135	7.13	587.3	1.31X10 ⁻²	-133.2	-17.2
Холодные воды (Нагорье Сангилен)																					
4	Алдын-Уургай, источник, основн. выход	50°13,408' 96°15,544'	28.06. 2025	4.9	7.0	-157	1.2	17.2	79.2	7.9	240.4	0.0	47.7	5.7	1.8	22	0.063	424.5	1.86X10 ⁻²	-130.5	-17.27
5	Бояй, источник, основной выход	50°42,436' 97°29,073'	28.06. 2025	7.3	7.40	-100	4.6	26.4	53.1	8.2	217.2	0.0	39.5	3.9	2.8	38	0.44	394.4	5.99X10 ⁻³	-	-
6	Пош-Тэй, источник	50°41,961' 97°28,252'	28.06. 2025	17.0	7.45	-209	5.9	56.3	18.0	5.2	187.9	0.0	32.1	8.9	7.0	80	5.65	403.3	1.30x10 ⁻²	-	-
Холодные воды (долина р. Элегест)																					
7	Айжо, скважина	51°45,794' 94°22,473'	13.07. 2024	5.8	6.8	-24	3.3	165.0	160.3	254.1	1515.7	0.0	568.3	24.8	<0.25	24	0.39	2721.0	5.50X10 ⁻⁵	-173	-22.3
8	Большая Кочетовская, скважина	51°28,906' 94°10,249'	14.07. 2024	7.3	7.15	-44	2.3	171.5	62.1	47.4	476.0	0.0	83.5	180.8	0.3	22	0.72	1049.7	1.03X10 ⁻²	-136	-17.9
9	Малая Кочетовская, скважина	51°28,994' 94°10,912'	14.07. 2024	5.9	7.20	-223	2.5	333.5	37.1	26.8	558.9	0.0	49.8	304.9	0.6	19	5.0	1338.0	2.05X10 ⁻²	-140	-18.3
10	Конная база, скважина	51°32,507' 94°07,158'	12.07. 2025	6.1	7.60	-135	2.6	87,5	82.2	39.5	442.8	0.0	158.0	42.5	0.5	21	0.097	877.5	4.00X10 ⁻⁴	-	-
11	Доозун-аржаан, источник, основн. выход	51°29,019 94°09,175	18.07. 2025	7.5	7.40	-130	2.7	107.9	68.1	30.2	377.1	0.0	98.8	94.3	0.5	23	0.062	804.7	2.21X10 ⁻³	-	-

Необходимо отметить, что содержание общего сероводорода ($\text{H}_2\text{S} + \text{HS}^-$) в воде данных источников меньше официально установленного норматива для минеральных вод (10 мг/дм^3) [3]; тем не менее такие воды, несомненно, можно считать целебными. Оздоровительный эффект от бальнеологического применения сероводородных вод подтвержден многолетней практикой: воды используются для питья и ваннных процедур, а грязевые отложения – в виде аппликаций. Кроме того, бактериальные маты, развитые на источнике Алдын-Уургай, тоже считаются целебным средством и употребляются в пищу. На этих источниках функционируют сезонные курорты, лечат здесь болезни желудочно-кишечного тракта, кожи, опорно-двигательного аппарата и др.

Сульфидные воды, благодаря их целебным свойствам, являются важной частью гидроминеральных ресурсов Тувы. Их дальнейшее освоение должно сопровождаться мероприятиями по охране от загрязнения и истощения.

Список литературы

1. Агентов В.Б., Агентова В.В., Ильина Т.А. Геологическая карта СССР, масштаб 1:200000. Серия Западно-Саянская, лист М-46-V. М.: Недра, 1966.
2. Богородицкий К.Ф., Валединский В.И. Гидроминеральные ресурсы // Природные условия Тувинской автономной области. Тр. Тувинской комплексной экспедиции, Вып. 3. М.: Изд-во АН СССР, 1957. С. 105–128.
3. Куликов Г.В., Жевлаков А.В., Бондаренко С.С. Минеральные лечебные воды СССР: Справочник. М: Недра, 1991. 399 с.
4. Намсараев Б.Б., Бархутова Д.Д., Данилова Э.В. и др. Геохимическая деятельность микроорганизмов гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: ГЕО, 2011. 302 с.
5. Оргильянов А.И., Копылова Ю.Г., Аракчаа К.Д. и др. Сульфидные воды нагорья Сангилен (Республика Тыва) // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов: опыт и перспективы использования в целях профилактики заболеваний, лечения и реабилитации больных. Мат-лы IV Междунар. научно-практ. конференции. Республика Тыва, Кызыл, 2-5 июля 2019 г. Т. 4. / Гл. ред. К.Д. Аракчаа. Кызыл: ООО «ИПП «Журналист», 2019. С. 117–122.
6. Шенькман Б.М. Связь геохимии подземных вод Прииркутской впадины с тектоникой // Вопросы гидрогеологии и гидрогеохимии. Мат-лы комиссии по изучению подземных вод Сибири и Дальнего Востока. Вып. IV. Иркутск: СО АН СССР, 1969. С. 71–78.

РЕКРЕАЦИОННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Павленко О.Л.¹, Курочкин В.Ю.²

¹*Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН, Тюмень, Pavlenko_Olga@tmnig.ru*

²*Екатеринбургский медицинский научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих
промпредприятий Роспотребнадзора, Екатеринбург*

Аннотация. В статье обосновывается необходимость законодательного оформления рекреационного использования подземных минеральных вод.

Ключевые слова: минеральные лечебные воды, рекреационное использование минеральных вод

Abstract. The article substantiates the need for legislative registration of the recreational use of mineral waters.

Keywords: mineral healing waters, recreational use of mineral waters

Подземные минеральные лечебные воды юга Тюменской области, добываемые более чем полусотней самоизливающихся скважин из готерив-барремских отложений, служат гидроминеральной базой для целого ряда санаториев, профилакториев, водолечебниц, осуществляющих медицинскую реабилитацию и санаторно-курортное лечение.

Кроме того, этой водой пользуется множество немедицинских организаций – баз отдыха, где можно круглогодично купаться в открытых бассейнах, а также спорткомплексов, предоставляющих в распоряжение посетителей джакузи с горячей минеральной водой.

Развитие в Тюменской области рекреационного туризма продвигается областной администрацией и поддерживается Ассоциацией туроператоров России. На эти цели потрачены значительные средства областного бюджета, планируется привлечение частных инвестиций для развития и создания новых рабочих мест в отрасли туризма и гостеприимства. Главный компонент этого развития – наличие практически бесконечных запасов подземных минеральных вод. Водоносные отложения залегают на значительной глубине – около 800–1100 м, сверху и снизу ограничены выдержанными водоупорами, что обеспечивает отсутствие гидравлической связи с другими горизонтами, хорошую защищенность горизонта от влияния внешних факторов и стабильность гидрохимических характеристик воды.

Берриасско-аптский водоносный горизонт (K_{1b}-a) представлен терригенными коллекторами – песчаниками и алевролитами карбанской свиты и нижнеалымской подсвиты, незакономерно переслаивающимися, не имеющими повсеместно прослеживаемых, выдержанных пропластков, тем не менее составляющих единый гидрогеологический горизонт общей мощностью до 250 м, эффективной мощностью до 100 м. Эксплуатационные объекты в разных скважинах находятся на различных гипсометрических уровнях относительно кровли и подошвы горизонта.

Все скважины, вскрывшие берриасско-аптский водоносный горизонт, в течение нескольких десятилетий работают в режиме самоизлива. Избыточное давление на устьях скважин в настоящее время составляет порядка 1–2 атмосфер. Температура воды на изливе от +38 °С до +42 °С, в ряде случаев достигает до +47...+48 °С.

Воды по химическому составу хлоридные натриевые, с минерализацией от 3 до 20 г/дм³. В ряде случаев отмечается повышенное (по сравнению с минимальными бальнеологически значимыми нормами) содержание йода, брома, бора, фтора. На минеральную воду выданы специальные медицинские заключения, свидетельствующие о том, что эта вода является природным лечебным ресурсом, который может использоваться в терапии целого ряда заболеваний.

Несмотря на такие, казалось бы, обширные перспективы, рекреационное использование минеральных вод в настоящее время находится вне правового поля.

Законом Российской Федерации № 2395-1 «О недрах» предусмотрен такой вид пользования недрами, как разведка и добыча полезных ископаемых. Какое это конкретно полезное ископаемое, для каких целей оно будет добываться, – это раскрывается другими нормативными документами. В частности, для минеральных вод таким документом является Закон Российской Федерации № 26-ФЗ «О природных лечебных ресурсах, лечебно-оздоровительных местностях и курортах», согласно которому минеральные воды относятся к природным лечебным ресурсам и могут быть использованы для организации санаторно-курортного лечения и медицинской реабилитации. Столь узкая, чисто медицинская направленность использования природных лечебных ресурсов закреплена в законе недавно – в 2023 г. До внесения соответствующих поправок в указанный Федеральный закон в дополнение к лечению фигурировала еще и организация отдыха населения – более широкая категория, включающая, помимо оздоровительного лечения, отдых вообще, в том числе предоставление посетителям загородных баз услуги рекреационных бассейнов.

Упомянутые базы отдыха, как и санатории, обеспечены лицензиями на пользование недрами для добычи минеральных вод для бальнеологических целей (лицензии получены до внесения поправок в 26-ФЗ), по ним выполнен полный комплекс геологической документации: разработаны бальнеологические заключения о качестве воды (в соответствии с ФЗ № 469-ФЗ от 04.08.2023 они признаны специальными медицинскими заключениями и действуют до 01.09.2029 [5, 6]), запасы числятся на государственном балансе запасов полезных ископаемых, утверждены проектные документы на разработку месторождения, оформлены горноотводные акты, составляются планы и схемы развития горных работ, ведется гидрогеологический мониторинг недр, предоставляется государственная и геологическая отчетность. Добросовестность недропользователей, таким образом, не ставится под сомнение. Однако теперь их деятельность в части купания людей в рекреационных бассейнах с минеральной водой нелегитимна.

По определению минеральной воды, данному в Общероссийском классификаторе полезных ископаемых и подземных вод ОК 032-2002, это вода, компонентный состав которой отвечает требованиям лечебных целей [4]. Минеральная вода – природный лечебный ресурс (26-ФЗ, ст. 2.1, п. 2). Лечебные свойства природных лечебных ресурсов устанавливаются на основании научных исследований, соответствующей многолетней практики и подтверждаются специальным медицинским заключением (26-ФЗ, ст. 2.1, п. 1). Природный лечебный ресурс можно использовать только для санаторно-курортного лечения и медицинской реабилитации (26-ФЗ, ст. 1, п. 1).

Как же теперь называть эту воду? В ОК-032-2002 отсутствует подходящая позиция. Подземные воды здесь делятся на питьевые, технические, минеральные, теплоэнергетические и промышленные. Минеральные, в свою очередь, могут быть бальнеологическими, питьевыми лечебными, питьевыми лечебно-столовыми. Куда отнести воду рекреационных бассейнов? Как ее поставить на баланс при следующей оценке запасов? Каким требованиям по качеству должна удовлетворять эта вода?

Ошибочно было бы применять для минерализованной воды ГОСТ 53491.1-2009 г. – «Бассейны. Подготовка воды»: качество исходной воды для заполнения и подпитки бассейна должно соответствовать санитарно-гигиеническим требованиям, предъявляемым к качеству пресной питьевой воды, а также к качеству горячей воды [1] (как минимум, по показателям «хлориды» и «прозрачность» эта вода не соответствует требованиям).

Безвыходность ситуации многие еще не оценили. Но как только наступит 01.09.2029 – срок действия выданных ранее бальнеологических заключений, – ни один недропользователь, вода которого используется не для санаторно-курортного лечения и медицинской реабилитации, не сможет получить специальное медицинское заключение. Запретить деятельность множества баз отдыха невозможно, заглушить и ликвидировать все

скважины расточительно, заставить недропользователей получать лицензии на медицинскую деятельность и оказывать услуги по санаторно-курортному лечению и медицинской реабилитации – нереально, но и пускать ситуацию на самотек тоже нельзя.

Тюменская минеральная вода – это морская вода, захороненная миллионы лет назад и преобразованная в системе вода – порода – органическое вещество под действием повышенной температуры и давления. Но морские ванны мы принимаем без направления врача, на морскую воду не выдается специальное медицинское заключение. Для минеральной воды, содержащей в небольших количествах биологически активные компоненты, не имеющие ярко выраженных лечебных свойств, близкой по составу и свойствам к морской воде, можно было бы получать заключение о ее безопасности для рекреационных целей, с рекомендациями либо ограничениями по использованию.

Ранее [3] нами было высказано предложение законодательно оформить рекреационное направление пользования минеральными водами, включить новую категорию: минеральная вода для рекреационного использования. Для этого следует внести поправки в Федеральный закон «О недрах», в Классификатор полезных ископаемых [4], Классификацию природных лечебных ресурсов [2], разработать нормативный документ на качество такой воды с определением граничных критериев содержания биологически активных компонентов. Сделать это, по крайней мере, на некоторый переходный период. В дальнейшем мы, возможно, придем к какому-то более правильному решению – при участии специалистов-куртологов и гидрогеологической общественности.

Список литературы

1. ГОСТ Р 53491.2-2012. Бассейны. Подготовка воды.
2. Классификация природных лечебных ресурсов, указанных в пункте 2 статьи 2¹ Федерального закона от 23 февраля 1995 г. № 26-ФЗ «О природных лечебных ресурсах, лечебно-оздоровительных местностях и курортах», их характеристик (утв. приказом Министерства здравоохранения Российской Федерации от 27.03.2024 № 143н).
3. Курочкин В.Ю., Павленко О.Л. Перспективы развития Тюменской области как гидроминерального курорта в связи с отсутствием правового регулирования вопросов использования минеральных вод в рекреационных целях // Недропользование – XXI век. Межотраслевой научно-технический журнал. 2025. № 1 (106). С.12–17.
4. Общероссийский классификатор полезных ископаемых и подземных вод. ОК 032-2002.
5. Правила подготовки и выдачи специальных медицинских заключений (утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 27.05.2024 № 681).
6. Федеральный закон от 23.02.1995 № 26-ФЗ «О природных лечебных ресурсах, лечебно-оздоровительных местностях и курортах».

К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ И УЧЕТЕ ПРОГНОЗНЫХ РЕСУРСОВ КАТЕГОРИИ P₃ ПОЛЕЗНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОПУТНЫХ ЖИДКИХ РУД ПРИ СОЗДАНИИ ГОСГЕОЛКАРТ МАСШТАБА 1:1 000 000 – 200 000

Петров В.В.

*Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского,
Санкт-Петербург, pvvaqua@mail.ru*

Аннотация. Анализ имеющегося материала по промышленным водам (жидким рудам) при повышенном спросе на редкие, редкоземельные и другие полезные химические элементы, часто распространенные в высоких концентрациях в природных водах, показывает перспективы оценки и учет прогнозных ресурсов категории P₃ при создании (актуализации) комплектов Госгеолкарты 1000/3, 200/2. В статье приведены примеры приемов оценки указанных прогнозных ресурсов.

Ключевые слова: *промышленные воды, жидкие руды, полезные химические элементы, прогнозные ресурсы, категория P₃, Госгеолкарта*

Abstract. Analysis of the available material on industrial waters (liquid ores) in conditions of increased industry interest in a number of rare, rare earth and other useful chemical elements, often common in high concentrations in natural waters, shows that it is promising to assess and take into account the forecast resources of category P₃ when creating (updating) sets of the Gosgeolcart 1000/3, 200/2. The article provides examples of methods for assessing these forecast resources.

Keywords: *industrial waters, liquid ores, useful chemical elements, forecast resources, P₃ category*

Помимо твердых горных пород высокими концентрациями рудных элементов характеризуются отдельные составляющие гидросферы – поверхностные и подземные минерализованные воды и рассолы (жидкие руды), которые также можно рассматривать как потенциально рудоносные геологические образования, в данном случае – гидроминеральные.

Жидкие руды – природные воды и рассолы, обогащенные рудными и нерудными компонентами (Li, Rb, Cs, Sr, B, Br, I, Ge, а также Au, Ag, Pt и др.), содержащимися в промышленных концентрациях. Интерес к использованию природных вод в качестве сырьевого источника редких и рассеянных элементов и минеральных солей определяется рядом преимуществ по сравнению с традиционными источниками указанных видов сырья. Жидкие руды характеризуются широким региональным распространением, большими геологическими и эксплуатационными запасами. Они являются поликомпонентным сырьем и часто могут одновременно использоваться в бальнеологии и теплоэнергетике. Важным преимуществом подземных вод как сырьевого источника редких элементов является низкая себестоимость продукта, так как подземные воды – полноценное сырье, эксплуатация водных месторождений редких элементов не требует дорогостоящих горных разработок.

Условные предельные значения концентраций полезных компонентов, позволяющие отнести подземные воды к промышленным, следующие (мг/дм³): литий – 10, рубидий – 3, цезий – 0.5, стронций – 300, германий – 0.02 и др. [7, 8]. В РФ жидкие руды используются для извлечения J, Br, B, но в перспективе могут явиться важным источником для добычи широкого спектра рудных элементов – Au, Ag, Pt, Li, Rb, Cs, Ge и др.

В ряде зарубежных стран (США, Италия, Израиль, Япония, Новая Зеландия, Исландия, Австралия и др.) постоянно и планомерно ведутся технологические исследования для разработки методов извлечения этих элементов из конкретных геохимических типов природных вод.

Особенности регионального распространения промышленных вод (жидких руд) изучались начиная с 50-х годов прошлого века коллективами ВСЕГЕИ (И.К. Зайцев, Е.А. Басков и др.), ВСЕГИНГЕО (С.С. Бондаренко, Н.В. Ефремочкин, Л.С. Балашов, М.С. Голицын, Р.И. Плотникова, Р.И. Иовчев и др.), ВЗПИ (М.В. Сыроватко, Г.И. Потапов и др.), ВНИИГ (А.И. Дзенс-Литовский, Е.Е. Керкис и др.), МГУ (М.Г. Валяшко, А.И. Поливанова и др.), институты Академии наук (Е.В. Пиннекер и др.), институтов нефтяной промышленности (М.И. Зайдельсон и др.), геологических управлений (П.И. Трофимук, Р.Ф.

Иванилова и др.) и др. Прогнозные гидрогеохимические карты СССР в масштабах 1:5 000 000 (1966) и 1:2 500 000 (1976) под редакцией И.К. Зайцева и Н.И. Толстихина были составлены во ВСЕГЕИ [2, 11]. На основе последней была составлена и издана в 1976 г. «Карта перспективной оценки минеральных ресурсов территории СССР. Минеральные промышленные воды. Масштаб 1:7 500 000» (И.К. Зайцева и Е.А. Баскова и др.) [4], входящая в комплект карт перспективной оценки минеральных ресурсов территории СССР (гл. редактор А.Д. Щеглов, отв. редактор от ВСЕГЕИ Д.В. Рундквист). В 2024 г. на ее основе в цифровом формате был составлен макет карты количественной геолого-экономической оценки ресурсного потенциала жидких руд территории РФ масштаба 1:5 000 000, редактор-составитель В.В. Петров [10].

В 90-е годы прошлого века сотрудниками СО РАН разработана методика оценки ресурсов и эксплуатационных запасов гидроминерального сырья Лено-Тунгусской НПП [1, 12] и выполнена экономическая оценка использования гидроминерального сырья Тунгусского бассейна, выявлены перспективные территории для освоения ресурсов [12].

В качестве нормативно-методических документов, разработанных в 2007–2023 гг., по данному направлению исследований можно использовать «Методические рекомендации по оценке запасов и прогнозных ресурсов промышленных подземных вод, попутно извлекаемых при разработке месторождений углеводородного сырья» [5, 8, 9]. Представляется возможным также воспользоваться «Методическими рекомендациями по выделению и обоснованию перспективных участков недр ...» [6]. Минерагенический потенциал жидких руд, как и твердых полезных ископаемых (уголь и т.п.), может учитываться в перспективных бассейнах или их частях. Его количественная оценка производится в тех же единицах, что и оценка прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Эта оценка выполняется на основе аналогии с изученными типовыми бассейнами с известной продуктивностью, может также опираться на результаты региональных исследований гидрогеологических и гидрогеохимических условий территории. Учет прогнозных ресурсов полезных химических элементов жидких руд по категории P_3 также можно проводить с использованием положений указанного документа.

Данные ресурсы учитывают потенциальную возможность открытия месторождений на основании благоприятных гидрогеологических и гидрогеохимических условий. Отметим, что под месторождением подземных промышленных вод (жидких руд) принято считать оконтуренный участок поверхности и недр Земли, в пределах которого разведаны или прогнозируются запасы полезных химических элементов, в количестве, обеспечивающем целесообразность его эксплуатации. Исходя из этого, наиболее перспективными для разработки следует считать месторождения жидких руд, приуроченные к разведанным либо эксплуатируемым месторождениям полезных ископаемых, содержащих подземные воды в качестве подтоварных, рудничных и т.п. [7, 13 и др.]. По некоторым оценкам аналитиков компании «Выгон Консалтинг» нефтегазовые компании могут заработать до \$13 млрд в год от продажи лития, полученного из подземных вод на своих месторождениях.

Представляется целесообразным проводить оценку прогнозных ресурсов категории P_3 полезных химических элементов жидких руд при создании или актуализации комплектов листов Госгеолкарты 1000/3, 200/2. Наиболее перспективно выполнять такую оценку на месторождениях полезных ископаемых, чаще всего месторождений углеводородов, расположенных в пределах листов Госгеолкарты, на которых проводятся съемочные работы. Результатом такого рода оценок может быть выделение инвестиционно привлекательных площадей.

Пока единственная такого рода оценка была выполнена в ходе работ по составлению Госгеолкарты 1000/3 листа Q-49-Удачный [3]. При этом оценены прогнозные ресурсы полезных химических элементов жидких руд по категории P_3 на алмазоносной тр. Удачная.

Рассолы, содержащие полезные химические элементы, накоплены на полигонах дренажных рассолов тр. Удачная. Проявление Октябрьское расположено на расстоянии

3.5 км от карьерного поля тр. Удачная. За период промышленной эксплуатации Октябрьского полигона захоронения дренажных рассолов (1986–2002 гг.) было накоплено из карьера тр. Удачная в многолетнемерзлые породы 10.6 млн м³ дренажных рассолов.

Проявление Киенгское находится в 5–15 км к юго-востоку от карьерного поля тр. Удачная. За период (2002–2012 гг.) промышленной эксплуатации Киенгского полигона захоронения дренажных вод было сброшено 12.1 млн м³ минерализованных стоков в многолетнемерзлые породы. Методом прямого подсчета была проведена оценка прогнозных ресурсов Октябрьского и Киенгского проявлений щелочных и щелочноземельных металлов по категории Р₃.

Прогнозные ресурсы Октябрьской и Киенгской прогнозируемых площадей щелочных и щелочноземельных металлов

Категория	Вид полезного ископаемого	Единица измерения	Оценка прогнозных ресурсов (ПР)	
			Октябрьское проявление	Киенгское проявление
Р ₃	Литий	тыс. т	1.412	1.612
Р ₃	Рубидий	тыс. т	0.162	0.185
Р ₃	Стронций	тыс. т	6.674	8.078

Прогнозные ресурсы полезных химических элементов в попутных рассолах на месторождениях полезных ископаемых следует подсчитывать по фактическим притокам и дебитам, фиксируемым в скважинах, горных карьерах, шахтах, других горных выработках, и по известным объемам в полигонах хранения дренажных рассолов.

Пример подсчета прогнозных ресурсов полезных компонентов выполнен в законтурных рассолах Дулисьминского и Верхнечонского месторождений нефти и газа [1].

На Дулисьминском месторождении ресурсы рассчитаны для рассолов по фактическим дебитам четырех законтурных скважин (суммарный дебит 426 м³/сут), на Верхнечонском по дебиту одной скважины, составившему 289 м³/сут. Расчет выполнен на период эксплуатации 10 000 сут при коэффициенте эксплуатации скважин 0.85 (суммарный отбор рассола на Дулисьминском месторождении 3.6 млн м³, на Верхнечонском – 2.5 млн м³). Прогнозные ресурсы лития для Дулисьминского месторождения составили 125 т (среднее содержание в рассоле 35 мг/дм³), а для Верхнечонского – 112 т (среднее содержание в рассоле 47 мг/дм³).

Исходя из вышесказанного с учетом [8], оценку прогнозных ресурсов попутных жидких руд на месторождениях полезных ископаемых можно разделить на ряд этапов.

На первом этапе исследований выявляются перспективные водоносные горизонты, содержащие промышленно-ценные химические элементы. На месторождениях нефти и газа это: 1 – самостоятельные рассолоносные пласты, залегающие выше или ниже залежи углеводородов; 2 – законтурные участки продуктивных нефтегазоносных пластов; 3 – продуктивные пласты с подтоварными водами, извлекаемыми совместно с нефтью.

На втором этапе определяются притоки попутных вод (q , м³/сут) в скважины. Если скважин несколько, их расход суммируется ($Q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots$). Суммарный дебит, как правило, не должен быть менее 300 м³/сут. Общий объем попутных вод определяется с учетом срока эксплуатации месторождения. Чаще всего при расчетах избирают срок эксплуатации месторождения в 10 000 сут.

На третьем этапе полученные воды анализируют. Определяется степень их минерализации, ионно-солевой состав, концентрации микрокомпонентов (X_{cp} , мг/дм³). При количественных расчетах следует использовать химические элементы, находящиеся в концентрациях выше условно-промышленных [7].

Четвертый этап – оценочный. Ресурсы определяются объемным способом. Для оценки прогнозных ресурсов (С) общий объем попутных вод в м³ умножается на среднюю

величину концентрации промышленно-ценного химического элемента ($X_{\text{ср}}$) $C=Q \cdot X_{\text{ср}}$. При расчетах следует учитывать плотность попутных вод. Прогнозные ресурсы дренажных вод, сосредоточенных в бассейнах-накопителях, рассчитываются аналогично. В этом случае объем дренажных вод определяется исходя из данных по осушению карьера либо другой горной выработки.

Пятый этап – учет перспективного объекта. На каждый перспективный объект организация-исполнитель завершенных работ по территории, получившей количественную оценку прогнозных ресурсов категории P_3 , в соответствии с регламентом составляет «Паспорт перспективного объекта». Этот паспорт представляет собой формализованное и унифицированное описание участка недр с количественно оцененными прогнозными ресурсами категории P_3 .

В заключение отметим, что выполнение данного вида работ позволит оценить ресурсный потенциал жидких руд России в отношении щелочных, щелочноземельных, редких, рассеянных и благородных металлов, повысит информативность комплектов Госгеолкарт 1000/3 и 200/2 и позволит выявлять инвестиционно привлекательные площади. Наиболее перспективными для разработки следует считать месторождения жидких руд, приуроченные к разведанным либо эксплуатируемым месторождениям полезных ископаемых, содержащим подземные воды в качестве подтоварных, рудничных и т.п.

Список литературы

1. Анциферов А.С., Садовникова И.И. Оценка ресурсов гидроминерального сырья юго-западной части Непско-Ботуобинской нефтегазоносной области. Материалы второй всероссийской научно-практической конференции. Часть 3. М.: ВСЕГИНГЕО, 2001. С. 69–71.
2. Гидрогеохимическая карта СССР (минеральные воды). Масштаб 1:7500000 / Ред. И.К. Зайцев, Н.И. Толстухин. М.: ВАГТ. 1966.
3. Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Анабаро-Вилуйская. Лист Q-49-Удачный. Объяснительная записка / Л.И. Сметанникова, В.И. Тихоненко, А.Б. Лобанов и др. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2020. 338 с.
4. Карта перспективной оценки минеральных ресурсов СССР: Подземные минеральные промышленные воды. Масштаб 1:7500000. Объяснительная записка / И.К. Зайцев, Е.А. Басков. Л.: ВСЕГЕИ, 1976. 19 с.
5. Классификация запасов и прогнозных ресурсов теплоэнергетических и промышленных подземных вод (утв. Приказом Минприроды РФ от 01.09.2011 № 718).
6. Методические рекомендации по выделению и обоснованию перспективных участков недр на твердые полезные ископаемые по результатам региональных геолого-геофизических и геологосъемочных работ / А.К.Иогансон, С.Н.Калабашкин, Ю.Б.Миронов и др. СПб.: ФГУП «ВСЕГЕИ», 2018. 45 с.
7. Методические рекомендации по изучению и оценке попутных вод месторождений полезных ископаемых в целях их использования в качестве гидроминерального сырья / Р.И. Иовчев, Л.И. Бинкова, Г.К. Павленко и др. М.: ВСЕГИНГЕО, 1985. 97 с.
8. Методические рекомендации по оценке запасов и прогнозных ресурсов промышленных подземных вод, попутно извлекаемых при разработке месторождений углеводородного сырья / Б.В. Боровский, С.С. Палкин, А.Л. Язвин. М.: АО «ГИДЭК», 2023Б. 44 с.
9. Методические рекомендации по комплексному изучению месторождений и подсчету запасов попутных полезных ископаемых и компонентов. М.: ФГУ «ГКЗ», 2007. 15 с.
10. Петров В.В. Отчет о результатах работ по объекту «Выполнение тематических и опытно методических работ по обеспечению комплексного сопровождения геологического изучения недр и воспроизводства минерально-сырьевой базы Российской Федерации, континентального шельфа в 2023–2025 гг. // Кн. 19. Практические рекомендации по оценке минерагенического потенциала жидких руд Российской Федерации. Росгеофонд, 2025.
11. Прогнозная гидрохимическая карта СССР масштаба 1:2500000. Объяснительная записка / Науч. ред. И.К. Зайцев. Л., 1976. 50 с.
12. Результаты работ по Межведомственной региональной научной программе «Поиск» за 1992–1993 годы. Новосибирск: НИЦ ОИГТМ СО РАН, 1995. 183 с.
13. Торигова М.В., Солодов Н.А., Солодов И.Н. Попутные воды, получаемые при добыче угля, нефти и руд – перспективный источник ценных металлов // Информационный сборник ВИЭМС, 1993. № 6. С. 12–20.

ПОДЗЕМНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ – НОВОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ УСКОРЕННОГО ВВОДА В ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННУЮ ЭКСПЛУАТАЦИЮ ТОМТОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИОБИЯ И РЕДКИХ ЗЕМЕЛЬ

Сентяков А.В., Васильев Д.М., Акзигитов Н.И.

ЗАО «Ижевский нефтяной научный центр», Ижевск, AVSentyakov@udn.rosneft.ru

Аннотация. Предложена принципиально новая двухстадийная схема разработки ниобий-редкоземельного месторождения Томтор с применением подземного выщелачивания для отработки редкоземельных руд. После снижения естественной радиоактивности выщезалегающих редкоземельных руд отработка ниобиевых руд может осуществляться открытым способом. Объем щелочных растворов, обогащенных редкоземельными металлами, будет на несколько порядков меньше объема транспортируемой руды, позволит избежать радиоактивного загрязнения больших территорий при использовании традиционной схемы первичной переработки руды открытым способом в кеках выщелачивания на комбинате первичного обогащения, резко повысит экономическую эффективность разработки месторождения для недропользователя и позволит использовать авиационный транспорт для вывоза первичного концентрата на предприятия вторичной переработки в товарные продукты.

Ключевые слова: Томторское месторождение, подземное выщелачивание РЗМ

Abstract. A fundamentally new two-stage scheme for the development of the Tomtor niobium-rare-earth deposit using underground leaching for the processing of rare-earth ores has been proposed. After reducing the natural radioactivity of the overlying rare-earth ores, the processing of niobium ores can be carried out using an open-pit mining method. The volume of alkaline solutions enriched with rare-earth metals will be several orders of magnitude smaller than the volume of transported ore, which will avoid radioactive contamination of large areas when using the traditional scheme of primary ore processing by open-pit mining in leach cakes at the primary enrichment plant. This will significantly increase the economic efficiency of the deposit's development for the subsoil user and allow the use of aviation transport for the export of primary concentrate to secondary processing facilities for the production of commercial products.

Keywords: Tomtor deposit, underground leaching of rare-earth metals

Месторождение Томтор расположено в Оленекском улусе Якутии (северо-восток Сибирской платформы), в 250 км южнее побережья Северного Ледовитого океана.

Климат района резко континентальный с продолжительной суровой зимой и коротким летом. Среднегодовая температура воздуха -14.5°C . Период ее положительных значений составляет 90–100 сут.

Для района характерно сплошное распространение многолетнемерзлых пород (ММП) мощностью до 750 м в пределах массива Томтор, средняя температура ММП -4.0°C [2].

Томторское месторождение представляет собой уникальное месторождение редкоземельных руд со средними содержаниями (мас. %): Y_2O_3 –0.578, Sc_2O_3 –0.045, TR_2O_3 –10.1, при кларковом числе содержания РЗМ в земной коре (мас. %) $n \cdot 10^{-4}$ – $n \cdot 10^{-3}$ и ниобиевых руд со средними содержаниями (мас. %) Nb_2O_5 –7,21, при кларковом числе содержания ниобия (мас. %) $2 \cdot 10^{-3}$ [1].

Первоначальная схема разработки Томторского месторождения предусматривала доставку руды для первичной переработки на ООО «Краснокаменский гидрометаллургический комбинат», расположенный на расстоянии около 5000 км от месторождения недалеко от границы с Китаем. Доставка планировалась по зимнику 350 км до порта в поселке Юрюнг-Хая, далее судами смешанного класса «река – море» ≈ 2000 км до Якутска, далее ≈ 2700 км железнодорожным транспортом [8].

Для получения оксидов и индивидуальных РЗМ необходима дальнейшая транспортировка продукции первичной переработки на заводы в Новосибирскую область либо в Красноярский край.

Очень сложная и затратная логистика по доставке руды к месту ее первичной переработки, при относительно низкой стоимости руды, ставит недропользователя на грань рентабельности, что является одной из главных проблем для ввода месторождения в эксплуатацию.

В то же время получение конечных продуктов переработки с очень высокой добавочной стоимостью, при относительно низких затратах, по старой экономической схеме разработки Томторского месторождения, предполагалось в системе предприятий госкорпорации «Росатом».

Руды редкоземельных металлов залегают над ниобиевыми рудами и имеют высокую естественную радиоактивность [4, 6, 7].

Для решения проблемы быстрого введения месторождения в эксплуатацию с целью добычи редкоземельных металлов, дефицит которых крайне остро ощущается в стране и в мире, впервые рассматривается вариант двухстадийной разработки Томторского месторождения с использованием подземного выщелачивания, в результате которого непосредственно на месторождении можно получить концентрат, содержащий до 70–75 % РЗМ и концентрат TR_2O_3 с реализацией продукта с очень высокой добавочной стоимостью, что повышает рентабельность разработки месторождения для недропользователя.

На первом этапе предлагается применить подземное выщелачивание редкоземельных металлов с помощью растворов щелочей, чтобы запустить месторождение в эксплуатацию [5].

На втором этапе, после снижения в процессе первого этапа естественной радиоактивности руд РЗМ до нормативных значений, возможно отрабатывать ниобиевые руды открытым способом по ранее предложенной схеме их доставки и переработки, которая является основной.

Предварительная разведка, во время которой было пробурено свыше 700 скважин, проведена геологами Чернышевской экспедиции АК «АЛРОСА» в 1990–1997 гг. [4].

Было установлено, что упомянутые выше отложения развиты на трех участках в центральной части массива Томтор, где они выполняют мульдообразные впадины на неровной поверхности массива.

Для извлечения РЗМ требуется прямая химическая переработка руд, при этом наиболее полное извлечение РЗМ происходит при отсутствии свободного кислорода [3].

Подземное выщелачивание с учетом свойств редкоземельных руд Томторского месторождения и оптимизации энергетических затрат необходимо проводить в циклическом режиме в два этапа.

В ходе цикла на первом этапе через нагнетательные скважины производится закачка разбавленных растворов щелочи с температурой замерзания не ниже $-10...-15$ °С. Эффективным мероприятием может оказаться применение хорошо отработанного в практике нефтедобычи приема «гидроразрыва пласта» для выщелачивания рудоносных аргиллитов и алевроитов, с целью проникновения щелочных растворов в толщу слабопроницаемых пород. С учетом климатических особенностей I этап подземного выщелачивания, в ходе которого контролируется процесс перехода РМЗ в щелочной раствор, может совпадать с зимним периодом.

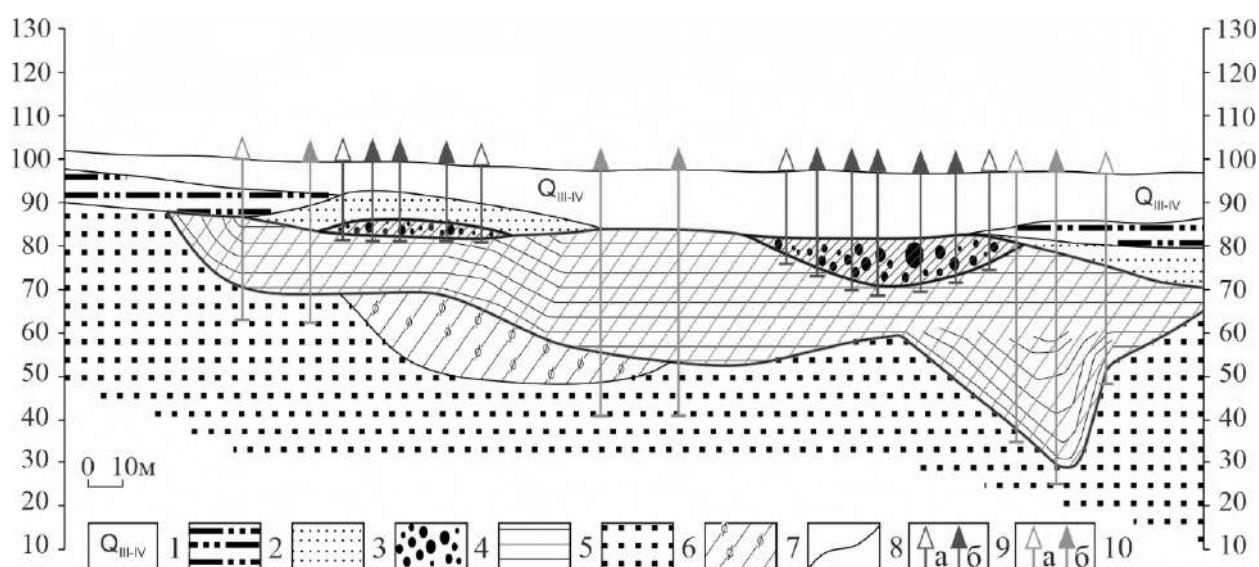
В ходе II этапа выполняется откачка растворов щелочи с пульпой РМЗ и ее термическая обработка с растворами концентрированных щелочей каустической соды (не менее 45 %) под давлением с температурой выщелачивания не ниже 210 °С, обеспечивающей оптимальный режим выщелачивания с получением первично обогащенного продукта, пригодного для дальнейшей металлургической переработки.

При выделении этапа разделения РЗМ и радиоактивного концентрата в процесс первичного обогащения вводится обработка концентрированной соляной кислотой.

После выведения растворов, обогащенных редкоземельными металлами, и их дополнительного концентрирования проектный объем получаемого продукта может составлять первые сотни или тысячи тонн.

Далее цикл повторяется. Контроль за эффективностью выщелачивания можно производить по снижению естественной радиоактивности редкоземельных руд и управлять процессом разработки, оптимизируя направление фильтрационных потоков.

Применение подземного выщелачивания позволяет исключить стадию первичной переработки руды в кеках выщелачивания в поверхностных условиях, что исключает радиоактивное загрязнение значительных по площади территорий. Для снижения объемов завозимого топлива, необходимого для первичной электрогенерации, планируется организовать вторичную электрогенерацию путем добычи водорода из ниобиевых руд, что позволит повысить экономическую эффективность первичной переработки редкоземельных руд, при этом ниобий будет оставаться в основной массе руды, которая не будет разубоживаться. Дополнительно возможно организовать электрогенерацию из возобновляемых источников энергии. Схема первого этапа разработки редкоземельных руд приводится на рисунке.



Геологический разрез участка Буранный и принципиальная схема размещения скважин на I этапе разработки Томторского месторождения.

1 – перекрывающие породы: делювиальные, озерные и аллювиальные отложения, Q_{III-IV} ; 2 – перекрывающие породы: морские алевролиты, песчаники, гравелиты, конгломераты плинсбахского яруса, J_1 ; 3 – перекрывающие породы: песчаники, гравелиты, конгломераты, алевролиты, прослои бурых углей буолкалахской свиты, P_{2-3bl} ; 4 – верхний горизонт ($C_2-P_1tm_2$) (руды РЗМ томторская толща) – хомогенно-осадочные образования: аргиллиты, алевриты тонкослоистые, песчаники, в краевых частях с щебнем и валунами выветрелых карбонатитов и щелочно-ультраосновных пород (пироклор-монацит-крандаллитовые руды); 5 – нижний горизонт ($C_2-P_1tm_1$) (ниобиевые руды) – алевролиты, песчаники мелкозернистые красноватые, с выделениями гиббсита, бемита; 6 – сидеритовый горизонт; 7 – франколитовый горизонт – фосфатные образования (субстрат томторской толщи) – кора латеритного выветривания рудоносных карбонатитов (C_2-P_1); 8 – геологические (литологические) границы; 9а,б – нагнетательные и добывающие скважины на РЗМ; 10а, б – нагнетательные и добывающие скважины для добычи водорода из толщи ниобиевых руд.

Для реализации метода требуется дальнейшая детальная проработка гидрогеологических, гидрохимических, геокриологических, экологических и технологических аспектов, включая контроль за термокарстом и защиту от радиоактивного фонового излучения на всех этапах разработки и транспортировки концентрата РЗМ и концентрата Th и U.

Основными гидрогеологическими задачами являются:

1. Поиск и разведка источника водоснабжения проектируемого объекта.

2. Получение необходимой информации для проектирования системы выщелачивания.
3. Создание гидрогеологической и гидрохимической модели месторождения для формирования и управления процессом заводнения и выщелачивания.
4. Производственный мониторинг.
5. Глубинное захоронение отработанных растворов с повышенной радиоактивностью.

Список литературы

1. Государственный баланс запасов полезных ископаемых РФ на 01.01.2016. Редкоземельные элементы. 2016.
2. Железняк М.Н., Мисайлов И.Е., Шац М.М. Эколого-геокриологические условия месторождения Томтор (Северо-Западная Якутия) // Разведка и охрана недр. 2018. № 4. С. 60–64.
3. Кузьмин В.И. и др. Особенности прямого щелочного вскрытия редкометалльных руд Томторского месторождения // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. 2023. Т. 16, № 4. С. 584–594.
4. Лапин А.В., Толстов А.В. Новые уникальные месторождения редких металлов в корях выветривания карбонатитов // Разведка и охрана недр. 1993. № 3. С. 7–11.
5. Сивачев Е.Л. Снижение температуры замерзания щелочного стока производства капролактама/Е.Л. Сивачев, В.Э. Суровая, А.А. Бобровникова // Сборник материалов X Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием «Россия молодая», 24–27 апреля 2018 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им.Т.Ф. Горбачева»; редкол.: С.Г. Костюк (отв. ред.) и др. Кемерово, 2018.
6. Толстов А.В., Черенков В.Г., Баранов Л.Н. Генезис и возраст рудной толщи Томторского месторождения ниобия и редких земель, северо-восток Сибирской платформы // Руды и металлы. 2020. № 4. С. 32–44.
7. Толстов А.В., Коноплев А.Д., Кузьмин В.И. Особенности формирования уникального редкометалльного месторождения Томтор и оценка перспектив его освоения // Разведка и охрана недр. 2011. № 6. С. 20–26.
8. Яценко В.А., Крюков Я.В. Оценка направлений поставок редкоземельной руды месторождения Томтор на переработку: пространственный аспект // Всероссийский экономический журнал ЭКО. 2016. № 8 (506). С. 37–50.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛЕЧЕБНОЙ ГИДРОМИНЕРАЛЬНОЙ БАЗЫ КУРОРТА ФЕДЕРАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ «БЕЛОКУРИХА»

Сидорина Н.Г.¹, Джабарова Н.К.¹, Коханенко А.А.¹, Коваленко Т.С.², Редин А.А.²,
Хващевская А.А.³

¹ФНКЦ МРиК ФМБА России, Солнечногорск, sidorinang@niikf.tomsk.ru

²АО «Курорт Белокуриха», Белокуриха

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

Аннотация. Дана оценка современного состояния лечебной гидроминеральной базы курорта федерального значения «Белокуриха». Показаны перспективы развития Белокурихинской курортной зоны за счет освоения новых месторождений и лечебно-оздоровительных местностей.

Ключевые слова: Алтайский край, курорт, лечебные гидроминеральные ресурсы

Abstract. An assessment of the current state of the medical hydromineral base of the resort of federal significance «Belokurikha» is given. The prospects for the development of the Belokurikhinsky resort zone through the development of new deposits and health-improving areas are shown.

Keywords: Altai Territory, resort, therapeutic hydromineral resources

Климатобальнеологический курорт «Белокуриха» (Алтайский край) является крупнейшим в Сибирском федеральном округе и относится к числу значимых здравниц Российской Федерации. Здесь функционируют более 20 санаториев. Курорт «Белокуриха» имеет статус курорта федерального значения на основании Распоряжения Правительства Российской Федерации от 23 июля 2024 г. № 1959-р «Об утверждении перечня лечебно-оздоровительных местностей федерального значения, курортов федерального значения, курортных регионов».

Основной ресурсной базой курорта «Белокуриха» являются благоприятные ландшафтно-климатические условия предгорной местности и минеральные воды Белокурихинского месторождения.

Курорт расположен в предгорьях Алтая в долине горной р. Белокуриха, на стыке северо-западной краевой части Алтайских гор и южной части обширной Приобской равнины. Горы резким уступом высотой в несколько сотен метров переходят в степные пространства левобережья р. Катунь и долины р. Обь. Для участков гор, примыкающих к территории курорта, характерны пологие склоны. Относительные превышения рельефа достигают 400 – 500 м.

Ландшафтно-климатические условия Белокурихинской курортной местности оцениваются как благоприятные для лечебно-оздоровительного и туристско-рекреационного использования. На формирование климата курорта оказывают влияние горная система Юго-Восточного Алтая и равнины Западной Сибири. Климат курорта Белокуриха умеренно континентальный низкогорных районов лесной зоны.

Подземные воды этой территории относятся к бассейну трещинных вод Горного Алтая. По общепринятым критериям подземные воды Белокурихинского месторождения относятся к типичным азотно-кремнистым термам, а зональным по содержанию в них радона. Бальнеологическая ценность вод определяется комплексом биологически активных веществ, таких как радон, метакремниевая кислота, фтор, а также повышенная щелочность, температура и газовый состав.

Разведочные работы на Белокурихинском месторождении проводились с 1931 г. в несколько этапов. Подсчет запасов подземных минеральных вод месторождения выполнялся неоднократно, в 1956, 1963, 1996 и 2021 гг. В 1980–1990 гг. наблюдалось изменение гидродинамической ситуации на месторождении в виде снижения напоров минеральных вод и ухудшения их качества, поэтому в 1996 г. запасы подземных вод месторождения были переоценены и утверждены в количестве 600 м³/сут. Полученные данные подтвердили

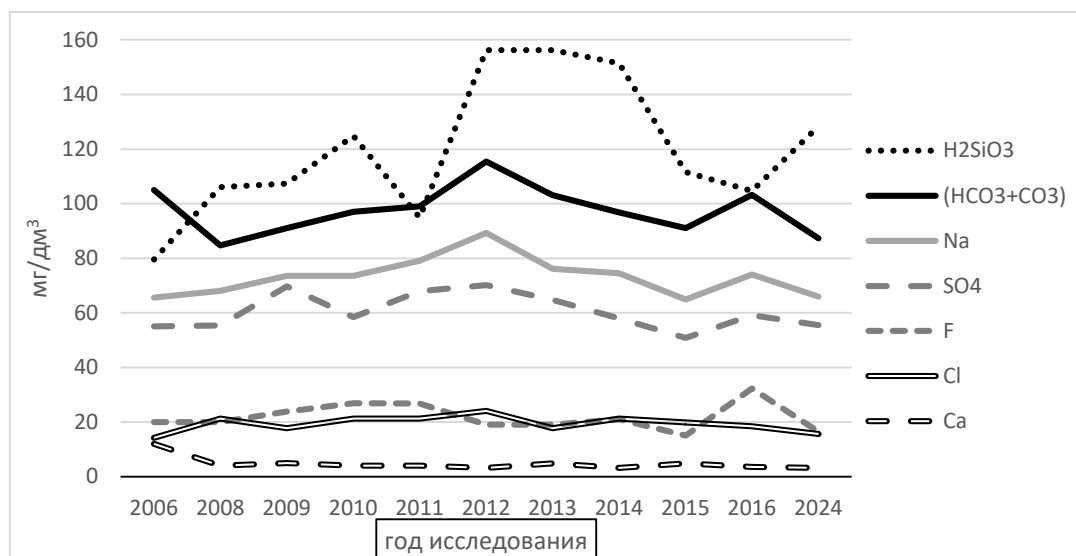
замкнутость контура месторождения, определяющего локализованность очага разгрузки Белокурихинских терм [3].

В настоящее время балансовые эксплуатационные запасы минеральных вод утверждены в количестве 600.0 м³/сут по категории «В», сроком на 25 лет (протокол ГКЗ «Роснедра» № 6687 от 18.06.2021 г.). Разрешенный объем добычи подземных вод по лицензионному соглашению составляет 600 м³/сут, что соответствует реальной потребности курорта в воде.

Белокурихинское месторождение минеральных лечебных вод находится в южной части города-курорта Белокуриха Алтайского края и приурочено к долине р. Белокуриха. Водозаборные скважины расположены в границах санаторно-курортной зоны города Белокуриха на левобережье р. Белокуриха. Водозабор состоит из трех эксплуатационных скважин (№ 3Д, № 3Э, № 4Э) с суммарным водоотбором 600.0 м³/сут, четырех резервных (№ 4Д, № 1Э, № 5Э, № 10Э) и трех наблюдательных (№ 3ГР, № 4ГР, № 10ГР).

Эксплуатация Белокурихинского месторождения минеральных вод осуществляется гидрогеологической службой АО «Курорт Белокуриха» в соответствии с разработанной ООО «Центр-Недра» «Технологической схемой эксплуатации Белокурихинского месторождения минеральных термальных радоновых вод».

Наблюдения за химическим составом минеральных вод Белокурихинского месторождения в течение двадцати лет выявили стабильность ионно-солевого состава, однако есть колебания содержания специфических компонентов. Экспериментальные данные по составу воды приведены на рисунке. Концентрация в воде ионов натрия (суммарно с калием) колеблется в пределах 62–89 мг/дм³. Содержание ионов кальция на уровне 2–12 мг/дм³, ионы магния отсутствуют. Разброс концентраций в воде гидрокарбонат-ионов (суммарно с карбонат-ионами) и сульфат-ионов составляет 70–125 мг/дм³ и 47–83 мг/дм³ соответственно.



Динамика изменения химического состава вод Белокурихинского месторождения.

Подача воды из эксплуатационных скважин ведется круглосуточно, с учетом фактических потребностей по отпуску бальнеологических процедур по минералопроводам в бальнеолечебницы санаторно-курортных организаций курорта (санатории «Белокуриха», «Родник Алтай», «Беловодье», «Алтайский замок», «Алтай», «Жемчужина Белокурихи», «Аврора», «Транссиб», «Эдем», «Катунь», «Сибирь», «Россия»; ФГБУ «Детский санаторий Белокуриха» Минздрава РФ).

В соответствии с Классификацией [4] минеральная подземная вода Белокурихинского месторождения относится по целевому назначению к категории вод для наружного

бальнеотерапевтического применения. По основным бальнеологическим показателям лечебной значимости вода относится к слаботермальным (термальным) (Т 25–45 °С) кремнистым (H_2SiO_3 79–163 мг/дм³) пресным (М 0.3–0.5 г/дм³) сульфатно-гидрокарбонатным натриевым водам с повышенным содержанием фтора (до 26 мг/дм³) со щелочной реакцией водной среды (рН 9.4–9.8).

Медицинские показания к применению природной минеральной воды в лечебно-профилактических целях для наружного бальнеотерапевтического применения (в виде общих и местных ванн, лечебных бассейнов, орошений): болезни системы кровообращения, болезни нервной системы, болезни костно-мышечной системы, болезни органов пищеварения, болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ.

Расширение лечебной гидроминеральной базы курорта возможно за счет освоения Искровского месторождения радоновых вод, расположенного в 13 км к западу от города-курорта Белокуриха в долине р. Большая Сычевка. Данное месторождение приурочено к Белокурихинскому гранитоидному массиву верхнего палеозоя, контролирующему также аналогичные Белокурихинское и Черновское месторождения термальных радоновых вод. Источниками питания вод этих месторождений являются инфильтрующиеся по мере продвижения в условиях высоких температур и давления азотно-кремнистые термы, близкие по химическому составу и специфическим компонентам (таблица).

Минеральные воды Белокурихинской курортной местности Алтайского края

Показатели	Белокурихинское месторождение		Искровское месторождение
Номер скважины/год бурения	3Э/ 1961	4Э/ 1961	37/ 1989
Глубина скважины, м	525	416	352.4
Утвержденные запасы	600.0 м ³ /сут по категории В, 2021 г.		840 м ³ /сут по категории В, 1991 г.
Температура воды, °С / рН	25–35 / 8.8–9.8	40–42 / 8.7–9.8	21–23 / 8.4–9.3
Минерализация, г/дм ³	0.36-0.49	0.34–0.47	0.32–0.43
Формула Курлова	HCO_3 (42–55) SO_4 (33–42) Cl (12–19) ----- (Na+K) (92–97) Ca (5–8)		HCO_3 (52–70) SO_4 (15–27) Cl (10–18) ----- (Na+K) (86–96) Ca (4–14)
Биологически активные компоненты, мг/дм ³	H_2SiO_3 79–163 F 15–26 Rn 5.0–9.5 нКу/дм ³		H_2SiO_3 80–165 F 15–24 Rn 42.5–54.5 нКу/дм ³
Тип минеральной воды (Классификация МЗ РФ)	Термальная слаборадоновая кремнистая фторсодержащая пресная сульфатно-гидрокарбонатная натриевая по составу со щелочной реакцией водной среды		Термальная среднерадоновая кремнистая фторсодержащая пресная сульфатно-гидрокарбонатная натриевая по составу со щелочной реакцией водной среды
Лечебное применение	Для наружного бальнеотерапевтического применения в виде общих и местных ванн, лечебных бассейнов, орошений		

Искровское месторождение минеральных вод разведано и рекомендовано к эксплуатации с утвержденными запасами минеральных вод в количестве 840 м³/сут по категории «В» (ГКЗ СССР, 1991). Утвержден «Проект округа горно-санитарной охраны Искровского месторождения» и разработан проект эксплуатационной скважины на Искровском месторождении. Подземные воды месторождения залегают на глубине 61–477 м, мощность водовмещающих зон 75–90 м. Содержание радона в воде скважины № 37 на порядок выше концентрации радона в водах Белокурихинского месторождения.

Искровское месторождение перспективно для освоения в качестве лечебно-сырьевой базы развивающегося курортно-рекреационного комплекса «Белокуриха-2». Для строительства комплекса выбран участок в низкогорной местности, расположенной в 8 км на юго-запад от города-курорта Белокуриха. Рельеф участка со снижением отметок к долине р. Малая Сычевка позволяет расширить возможности использования прибрежной территории в оздоровительных целях. Расположенные рядом живописные горные залесенные возвышенности (горы Глухариха, Сухая Грива) используются для строительства горнолыжных трасс различной протяженности.

В связи с расширением туристской деятельности в Белокурихинской курортной зоне планируется создание и туристско-рекреационного комплекса «Белокуриха-3» в предгорной долине р. Песчаная.

Оценка ландшафтно-климатических условий территорий комплексов «Белокуриха-2» и «Белокуриха-3», расположенных в переходной зоне горы – равнина, показала их соответствие лечебно-оздоровительным местностям [1].

Таким образом, Белокурихинская курортная местность располагает достаточными запасами лечебных минеральных вод для наружного применения. В перспективе возможно введение в эксплуатацию и Черновского месторождения минеральных вод с прогнозными ресурсами 1000 м³/сут (Р₁, 1991).

Для питьевого курсового лечения в санаториях используется маломинерализованная хлоридно-карбонатно-сульфатная кальциево-натриевая вода (Солоновское проявление Березовского месторождения), а для грязелечения – привозные лечебные сульфидно-иловые грязи озер степного Алтая. В будущем для расширения грязелечения на курорте целесообразно провести ревизионное обследование оз. Декава, расположенного в 55 км к западу от курорта «Белокуриха» в бассейне р. Песчаной. По результатам предварительной разведки (Фокин Ю.А., 1980) ориентировочные запасы лечебных сапропелей данного озера составляют 100 тыс. м³ [2].

Современное состояние природных лечебных ресурсов курорта «Белокуриха» отвечает требованиям нормативных документов для осуществления деятельности в качестве климатобальнеологического курорта федерального значения. Курорт имеет перспективы расширения лечебной гидроминеральной базы.

Список литературы

1. Джабарова Н.К., Яковенко Э.С., Сидорина Н.Г., Коханенко А.А., Воробьев В.А., Зайцев А.А., Коваленко Т.С., Жиликов И.В. Перспективы развития Белокурихинской курортной зоны Алтайского края // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2016. № 2. С. 43–47.
2. Елисеев В.А. Сапропели Белокурихинской санаторно-курортной зоны // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2011. № 2. С. 40–42.
3. Логинов А.А. Новые данные о величине эксплуатационных запасов радоновых терм Белокурихинского месторождения на Алтае // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 1998. № 6. С. 50–51.
4. Приказ Министерства здравоохранения РФ от 27 марта 2024 г. № 143н «Об утверждении классификации природных лечебных ресурсов, указанных в пункте 2 статьи 2.1 Федерального закона от 23 февраля 1995 г. № 26-ФЗ «О природных лечебных ресурсах, лечебно-оздоровительных местностях и курортах» их характеристик и перечня медицинских показаний и противопоказаний для санаторно-курортного лечения и медицинской реабилитации с применением таких природных лечебных ресурсов».

АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ГИДРОМИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Фомина Я.В.

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск,
sadykovayv@ipgg.sbras.ru*

Аннотация. В настоящее время в связи с необходимостью обеспечения потребности РФ в собственном литии растет интерес к промышленным подземным водам. В пределах Ангаро-Ленского артезианского бассейна распространены хлоридные натриевые и кальциевые рассолы с высокими концентрациями полезных компонентов: Li, Rb, Sr, B, Br, I и др. После извлечения полезных компонентов наиболее экологичным и экономически рентабельным является дальнейшее размещение рассолов в глубокозалегающих водоносных горизонтах. Необходимо тщательно планировать выбор подходящего объекта для размещения, чтобы избежать разбуживания концентраций полезных компонентов. Решающее значение будет иметь проведение физико-химического моделирования взаимодействия в системе вода – порода и лабораторных экспериментов.

Ключевые слова: литий, промышленные воды, гидрогеохимия, гидроминеральное сырье, Восточная Сибирь, Ангаро-Ленский бассейн

Abstract. Currently, interest in industrial groundwater is growing due to the need to meet Russia's lithium needs. Sodium and calcium chloride brines with high concentrations of useful components, including Li, Rb, Sr, B, Br, I, and others, are common in the Angara-Lena artesian basin. After extracting the useful components, the most environmentally friendly and economically viable option is their subsequent disposal in deep aquifers. Careful planning of the selection of a suitable placement site is essential to avoid dilution of the concentrations of useful components. Physicochemical modeling of interactions in the water-rock system and laboratory experiments will be crucial.

Keywords: lithium, industrial water, hydrogeochemistry, hydromineral raw materials, Eastern Siberia, Angara-Lena basin

Подземные рассолы Восточно-Сибирской артезианской области содержат высокие концентрации полезных компонентов, таких как йод, бром, бор, различные соединения магния, калия, лития, рубидия, цезия, стронция и др. Они распространены в водоносных комплексах соленосной и подсолевой гидрогеологических формаций, образуя обширные месторождения промышленных вод, часто расположенные вблизи контуров залежей углеводородов. Они давно рассматриваются в качестве нетрадиционного источника минерального сырья, но в 2025 г. встал вопрос об обеспечении собственным литием экономики Российской Федерации к 2030 г.

В 2025 г. ряд недропользователей поставил на баланс запасы месторождений промышленных вод, находящихся в пределах имеющихся у них участков для геологического изучения и добычи других видов полезных ископаемых. Чаще всего это участки, на которых ведется добыча углеводородов, а промышленные подземные воды являются сопутствующим продуктом, который после извлечения полезных компонентов планируется использовать для систем поддержания пластового давления или в качестве технических жидкостей. При таких условиях добыча ценных компонентов из попутных вод экономически оправдана, потому что не требуется значительных капиталовложений для извлечения их из недр, используется вся существующая инфраструктура, дополнительные расходы связаны лишь с установками для переработки рассолов. В 2026 г. ФГУП «Роснедра» (Центрсибнедра) выставляет ряд участков нераспределенного фонда недр на аукцион с лицензиями для геологического изучения, разведки и добычи промышленных вод как самостоятельного вида полезных ископаемых. В связи с этим возникают четыре крупных задачи, которые необходимо решить недропользователям для успешной реализации проектов по добыче и переработке промышленных вод. Первая задача связана с выбором наиболее перспективных водоносных горизонтов, содержащих как максимальные концентрации полезных компонентов, так и подходящие термобарические условия. Вторая – обоснование наиболее подходящих технологий переработки промышленных вод для обеспечения наибольшей рентабельности. Третья задача относится к проблемам дальнейшей утилизации рассолов. Накопление больших объемов промышленных вод после извлечения из них полезных компонентов требует принятия решения об их правильной утилизации. Четвертая задача связана с

постановкой на баланс запасов месторождения промышленных вод, расчетом кондицией полезных компонентов и проведением технико-экономической оценки.

Рассмотрим первые три задачи подробнее на примере Ангаро-Ленского бассейна, как наиболее перспективного на гидроминеральное сырье в пределах Восточной Сибири. В основании разреза выделяется подсолевая гидрогеологическая формация, сложенная вендскими и нижнекембрийскими отложениями, а в верхней части разреза распространены соленосная и надсолевая формации, представленные породами кембрийского, ордовикского и четвертичного возраста. Надсолевая формация соответствует верхней части разреза (до 800–1000 м) от современных четвертичных образований до отложений верхоленской свиты верхнего и среднего кембрия включительно и является зоной активного водообмена. Воды надсолевой формации пресные, общая минерализация достигает 0.8 г/дм³. Преобладающий химический тип вод – гидрокарбонатный кальциевый. Надсолевая формация не рассматривается в качестве перспективной для получения промышленных компонентов, поскольку содержит их в незначительных количествах и не может быть использована для захоронения отработанных промышленных рассолов, поскольку содержащиеся в ней воды широко используются для хозяйственных и питьевых целей.

Соленосная формация представлена литвинцевской, ангарской, булайской, бельской и усольской свитами, сложенными переслаиванием карбонатных и соленосных пород. По своим гидродинамическим особенностям они объединяются в литвинцевский, булайско-нижнеангарский, верхнеусольско-бельский и даниловско-нижнеусольский водоносные комплексы. Между собой они разделяются верхнеангарским, верхнебельским, верхнеусольским водоупорными горизонтами, представленными преимущественно соленосными породами. Солоноватые и соленые воды распространены в верхней части соленосной формации (литвинцевская свита). Залегающие ниже комплексы характеризуется развитием рассолов с минерализацией от 150 до 600 г/дм³. Все они являются хлоридными натриевыми и кальциевыми по составу, часто с повышенным содержанием магния.

Литвинцевский водоносный комплекс представлен келорским горизонтом, сложенным двумя пластами карбонатных пород, разделенных каменными солями. Карбонаты по типу коллектора являются трещинными, кавернозными, открытая пористость в них достигает 12 %. Мощность комплекса 120–250 м. Флюидоупором в подошве служит галогенно-карбонатный горизонт верхней части ангарской свиты. Пластовая температура комплекса достигает 22–25 °С, а давление – 4–11 МПа, что чаще всего ниже условно-гидростатического. При бурении зафиксированы процессы поглощения бурового раствора различной интенсивности. В комплексе распространены солоноватые и соленые воды, которые переходят в рассолы с минерализацией от 1.5 до 65 г/дм³ преимущественно хлоридного натриевого и кальциевого состава. Литвинцевский комплекс содержит самые низкие концентрации промышленных компонентов (мг/дм³): Li до 1, Sr – 27, Br – 0.2, поэтому добыча из них промышленных вод не рентабельна. Кроме того, отсутствие надежных региональных флюидоупоров делает этот комплекс недостаточно надежным для размещения отработанных рассолов.

Бильчирский и биркинский водоносные горизонты булайско-нижнеангарского комплекса представлены преимущественно доломитами, известняками. Породы по типу пустотного пространства относятся к кавернозно-поровым, порово-трещинным, поры часто имеют битуминозное и нефтяное насыщение. Открытая пористость составляет 3.5–7.0 %, проницаемость низкая. Из отложений комплекса получены притоки подземных вод с минерализацией от 250 до 500 г/дм³. Состав вод преимущественно хлоридный натриевый кальциевый, отмечается высокая степень метаморфизации рассолов. В интервалах высокой трещиноватости и кавернозности водоносных горизонтов отмечаются процессы поглощения бурового раствора. Температура составляет 24–36 °С, а пластовое давление составляет 11–15 МПа. Микрокомпонентный состав отличается высоким содержанием (мг/дм³) лития – до 210, рубидия – до 50, стронция – до 8070 мг/дм³.

Верхнеусольско-бельский водоносный комплекс подразделяется на атовский, христофоровский и балыхтинский и межсолевой горизонты, представленные переслаиванием известняков, доломитов, глинистых доломитов и ангидрито-доломитов. Тип коллекторов: поровый, трещинно-поровый, кавернозно-поровый. Фильтрационно-емкостные свойства очень изменчивы: пористость в среднем составляет 3–6%, проницаемость низкая – до 10×10^{-3} мкм². В комплексе распространены сверхкрепкие рассолы с минерализацией до 630 г/дм³. Микрокомпонентный состав отличается наиболее высокими концентрациями (мг/дм³): Li – до 700, Rb – до 200, Sr – до 10600, I – до 22, В – до 358, Br – до 10600. Пластовое давление варьируется от нормального до аномально высокого – от 22 до 46.6 МПа. Пластовая температура достигает 60 °С. Процессы поглощения бурового раствора отмечаются по всему комплексу от частичного до полного.

Подсолевая гидрогеологическая формация сверху ограничена в кровельной части усольским региональным флюидоупором, снизу – кристаллическими породами фундамента. Даниловско-нижнеусольский водоносный комплекс расположен в нижней части соленосной формации и в верхней части подсолевой. Комплекс представлен осинским, усть-кутским и преображенским горизонтами, сложенными известняками и доломитами, в подчиненном количестве присутствуют прослои ангидритодоломитов, ангидритов, аргиллитов и солей. В комплексе распространены рассолы с минерализацией до 630 г/дм³ со следующими фоновыми содержаниями микрокомпонентов (мг/дм³): Li – до 400, Rb – от 20 до 40, Sr – до 5500, Br – 9000, I – 140, В₂O₃ – 500. По всему комплексу фиксируются поглощения бурового раствора. Пластовое давление колеблется от 29 до 49 МПа, температура достигает 50 °С.

Ниже залегает непско-тирский гидрогеологический комплекс, сложенный парфеновским, шамановским, боханским и базальным горизонтами. Комплекс представлен разнотекстурными песчаниками с подчиненными прослоями алевролитов и аргиллитов, является нефтегазоносным в пределах Ангара-Ленской НГО. Для комплекса характерно нормальное и аномально низкое пластовое давление; так, в парфеновском горизонте оно в среднем составляет 25.7 МПа, а в боханском – 27.3 МПа. Пластовая температура в парфеновском горизонте достигает 61 °С. В некоторых скважинах в парфеновском и боханском горизонтах фиксируется поглощение бурового раствора от частичного до полного. По результатам гидрогеохимического анализа минерализация рассолов изменяется от 313 до 484 г/дм³, воды преимущественно хлоридного кальциевого и магниев-кальциевого типа с высокой степенью метаморфизации. В терригенном комплексе также отмечаются высокие концентрации полезных компонентов (мг/дм³): лития – до 370, стронция – до 6200, рубидия – до 100, брома – до 7500, йода – до 90, окиси бора – до 150.

Таким образом, подземные воды соленосной и подсолевой гидрогеологической формации содержат магний, бром, бор, литий, рубидий, цезий, стронций в концентрациях, во много раз превышающих рентабельные для промышленного извлечения; следовательно, они являются поликомпонентными промышленными рассолами.

Изучение современных технологий извлечения лития из пластовых вод показало, что наиболее подходящими являются методы прямой экстракции лития. Эти методы сочетают в себе сорбционные, мембранные технологии, химическое осаждение и другие процессы [4]. Помимо лития интерес представляют также йод, бром, калий, магний, стронций, рубидий, добыча которых не менее важна для обеспечения потребностей национальной экономики и может способствовать повышению рентабельности проектов по добыче гидроминерального сырья. В последнее время многие нефтегазовые компании запатентовали методики добычи лития из рассолов, в которых учитываются различные специфические параметры, такие как низкий pH и высокое содержание ионов Mg. Подбор наиболее подходящих способов экстракции карбоната лития и других компонентов остается на усмотрение недропользователей. После извлечения полезных компонентов остро стоит вопрос о дальнейшей утилизации рассолов, обусловленный высокой степенью их экологической опасности для окружающей среды.

Среди основных промышленных методов утилизации рассолов можно выделить следующие: 1) выпаривание с последующей кристаллизацией солей и возможностью их использования для добычи других полезных компонентов (например, антигололедного компонента – гранулированного CaCl_2); 2) закачка в глубокозалегающие водоносные горизонты, имеющие подобный состав флюидов; 3) складирование в подготовленные заранее полигоны (хвостохранилища, отработанные рудники, шахты); 4) очищение рассолов с помощью обратного осмоса.

Выбор методов обращения с оставшимися рассолами после извлечения полезных компонентов в основном зависит от трех факторов: доступных технологий переработки, уровня экономических затрат, экологической эффективности. В настоящее время наилучшим способом утилизации вод после извлечения полезных компонентов является технология дальнейшей закачки их в глубокозалегающие водоносные горизонты. Размещение в пластах горных пород отработанных рассолов позволит избежать загрязнения земель солями, содержащимися в подземных водах. Использование технологии закачивания рассолов в пласт базируется на методике, хорошо отработанной на возврате подтоварных вод месторождений углеводородов и утилизации избыточных рассолов калийных производств [2]. Основные требования – максимальное соответствие химического состава размещаемых вод и пластового флюида и соблюдение температурного режима для предотвращения повышенного выпадения солей на оборудование и в призабойную зону скважины [1]. Детальный анализ геологических и гидрогеологических условий недр позволит определить вмещающий пласт и его основные характеристики: литологический состав коллектора, фильтрационно-емкостные свойства, мощность, состав флюидов, термобарические условия, наличие надежного водоупорного горизонта и т.д. Закачка отработанных рассолов может осуществляться в водоносные горизонты, расположенные ниже регионального водоупора или зоны гидроразрыва, чтобы избежать миграции вод в вышезалегающие водоносные горизонты.

Анализ гидрогеологических особенностей показал, что в пределах Ангаро-Ленской НГО булайско-нижеангарский и верхнеусольско-бельский водоносные комплексы наилучшим образом подходят для размещения отработанных рассолов. Состав подземных вод этих комплексов аналогичный, и они надежно экранированы в кровельной части пластами солей. При выборе объекта для размещения отработанных рассолов лучше останавливаться на залегающем выше комплексе, в этом случае не произойдет существенного изменения гидродинамического режима и разубоживания концентраций полезных компонентов. Подсолевая формация в пределах Ангаро-Ленского бассейна содержит газоконденсатные залежи, в связи с этим крайне не рекомендуется проводить закачку отработанных рассолов в данный интервал. Существенное изменение гидродинамического режима может повлиять на контур залежи и процессы добычи углеводородов. Тем не менее окончательное решение может быть принято только после проведения гидрогеохимического моделирования взаимодействия закачиваемых рассолов и системы вода – порода целевого горизонта и лабораторных экспериментов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования проект № FWZZ-2026-0047.

Список литературы

1. Рябцев А.Д., Коцупало Н.П., Вахромеев А.Г. и др. Поликомпонентные литиеносные рассолы Сибирской платформы – сырье многоцелевого назначения // Рациональное освоение недр. 2013. № 1. С. 44–51.
2. Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Vakhromeev A.G. Brines of the Siberian platform (Russia): Geochemistry and processing prospects // Applied geochemistry. 2020. Vol. 117. 104588.
3. Baspineiro C.F., Franco J., Flexer V. Potential water recovery during lithium mining from high salinity brines // The Science of the total environment. 2020. Vol. 720. 137523.
4. Farahbakhsh J., Arshadi F., Mofidi Z. et al. Direct lithium extraction: A new paradigm for lithium production and resource utilization // Desalination. 2024. Vol. 575. 117249.

VII. КАЧЕСТВО И ОХРАНА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ИССЛЕДОВАНИЕ АНОМАЛЬНОГО ТРАНСПОРТА РАДИОНУКЛИДОВ В ТРЕЩИНОВАТЫХ ВОДОНОСНЫХ МАССИВАХ (В СВЯЗИ ПРОБЛЕМОЙ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЯХ)

Вилькина М.В.^{1,2}, Румынин В.Г.^{1,2}, Никуленков А.М.^{1,2}, Розов К.Б.^{1,2}, Гембель Л.Р.¹,
Ереев Д.А.¹

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Рассмотрены аномальные эффекты при переносе вещества (на примере радионуклидов) фильтрационными потоками гидродинамической (формирование перколяционных кластеров в трещиноватых породах) и физико-химической (необратимая сорбция радионуклидов на подвижных коллоидах) природы, приводящие к росту транспортной способности радионуклидов в водоносных горизонтах. Теоретический анализ проиллюстрирован результатами полевых и лабораторных исследований, а также математическим моделированием.

Ключевые слова: подземные воды, трещиноватые породы, радионуклиды, миграция, сорбция

Abstract. Anomalous effects in subsurface solute transport (using radionuclides as an example) by groundwater of both hydrodynamic nature (formation of percolation clusters in fractured rocks) and physicochemical nature (irreversible sorption of radionuclides onto mobile colloids) are considered. These effects lead to an enhanced transport capacity of radionuclides in aquifers. The theoretical analysis is illustrated by results from field and laboratory studies, as well as by mathematical modeling.

Keywords: groundwater, fractured rock, radionuclides, subsurface solute transport, sorption

В современной подземной гидродинамике, в частности в теории переноса вещества фильтрационными потоками, все чаще используется понятие «аномальный перенос», под которым понимается движение частиц со скоростью, превышающей среднюю действительную скорость фильтрации, и/или отклонение от классического фиковского конвективно-дисперсионного переноса.

Трещиноватые породы являются одним из канонических примеров геологической среды, в которой ожидается, а чаще всего имеет место аномальный перенос вследствие:

- эффекта перколяции;
- сильных контрастов скоростей фильтрации (в системе трещины – матрица);
- наличия (формирования) «предпочтительных путей течения»;
- высокой пространственной изменчивости макроскопической проницаемости пород;
- ограниченного поперечного перемешивания;
- диффузии вещества в матрицу.

К характерным особенностям относятся:

- негауссовская форма концентрационных ореолов, формирующихся на участках загрязнения подземных вод;
- раннее появление вещества в точках наблюдения, в частности индикатора в трассерных экспериментах, и выраженное «длиннохвостое» затухание регистрируемой концентрационной функции, или мультимодальный ее характер;
- масштабная зависимость расчетных коэффициентов дисперсии, в частности нелинейный рост дисперсии концентрации во времени;
- эффект памяти (немарковский характер переноса).

В результате перенос растворенных веществ в трещиноватых средах часто не удовлетворяет предпосылкам классического уравнения адвекции (конвекции) – дисперсии (ADE).

Аномальные эффекты при миграции, проявляющиеся в быстром переносе растворенных веществ, традиционно относящихся к сорбционно-активным, могут быть обусловлены также физико-химическими взаимодействиями и преобразованиями сорбцией компонентов на подвижных коллоидах, формированием ионообменных волн или волн растворения минеральной фазы водовмещающих пород.

Особенности фильтрационных потоков в трещиноватых массивах, нарушенных проницаемыми зонами тектонической деформации. Гидрогеологическая схематизация кристаллических массивов, предназначенных, в частности, для глубинной изоляции радиоактивных отходов (РАО), обычно сводится к выделению зон повышенной трещиноватости, формирующихся в процессе тектонической деформации массива. Связность этих зон между собой определяет макроскопические (региональные) фильтрационные свойства массива. Характерными примерами являются кристаллические породы Балтийского щита, где планируется размещение пунктов захоронения РАО и отработавшего ядерного топлива: участки Äspö Site и Forsmark Site (Швеция) и ONKALO (Финляндия). Наши исследования последних лет были связаны с пунктом глубинного захоронения радиоактивных отходов в гнейсовом обрамлении Нижнеканского гранитоидного массива (участок Енисейский) [1]. Большинство зон повышенной проницаемости на участке приурочено к контактам долеритовых даек с вмещающими гнейсами. На настоящий момент достоверная информация о геолого-гидрогеологическом строении участка Енисейского ограничена двумя десятками скважин, расположенными на расстоянии 350 – 500 м друг от друга. Это вносит высокую долю неопределенности в описание геофильтрационной структуры массива, что оправдывает переход от его детерминированного представления к стохастическому – на основе современных методов многоточечной геостатистики. В качестве тренировочного образа использовалась геологическая модель объекта-аналога (горнохимический комбинат), также расположенного в пределах метаморфического гнейсового массива.

Роль трещиноватой матрицы между выделенными линейными зонами повышенной проводимости остается до конца не установленной, ибо изучение общих закономерностей в таких мультимодальных средах опытно-фильтрационными работами или на DFN-моделях регионального масштаба представляется крайне ресурсоемким и трудозатратным. В этой связи была разработана 2D вспомогательная модель фильтрации в изотропной трещиноватой среде (для условий превышения порога перколяции [3]) единичного масштаба с соблюдением довольно жестких критериев пространственно-временной фрагментации модельной области. Вычислительные эксперименты позволили выявить немонотонное поведение функции времени миграции инертных частиц, t , при росте фильтрационного контраста – отношения проницаемости трещин к проницаемости пористой (или слаботрещиноватой) матрицы, $v = k_f / k_m$. Эта зависимость была аппроксимирована так называемой кроссоверной функцией для безразмерного времени:

$$\tau(v) = (1 + (\tau_\infty - 1)\psi_1) \left(\frac{\alpha v + \bar{v}^\beta}{1 + \bar{v}^\beta} \right), \quad (1a)$$

$$\psi_1 = \frac{\bar{v}^\beta}{\alpha v + \bar{v}^\beta}, \quad \tau = t / t_f, \quad t_f = n_f L / k_f I, \quad \alpha = n_m / n_f, \quad (1b)$$

где $\bar{v} = v / v_c$; L и I – линейный размер области фильтрации и средний градиент; v_c – пороговое значение v , превышение которого приводит к увеличению доли хорошо проводящих сегментов в перколяционном кластере; k и n – коэффициент фильтрации и пористость/трещиноватость (индексы f и m относятся к трещинам и матрице); τ_∞ – нормированное время движения частицы в перколяционном канале при $v \gg v_c$; β – эмпирический коэффициент.

Наблюдаемая немонотонная зависимость нормированного времени миграции τ от фильтрационного контраста v отражает переход от смешанного режима фильтрации,

фиксирующего как в матрице, так и в трещинах, к режиму, в котором миграция контролируется исключительно геометрией перколирующего кластера.

Полученный результат был скорректирован на случай фильтрационно-анизотропной или структурно-коррелируемой трещиноватой среды, характеризующейся анизотропией эффективного коэффициента фильтрации k_x^{eff} / k_y^{eff} или анизотропией корреляционного масштаба λ_x / λ_y [4]. Это в дальнейшем позволит выполнить обратный переход от вспомогательной модели к реальной модели участка Енисейского для анализа возможности формирования связанных потоков в выделенных контактных зонах даек и оценке вероятности быстрого транспорта радионуклидов по этим каналам.

Исследование быстрого транспорта радионуклидов на коллоидах. Многочисленные экспериментальные данные указывают на то, что коллоиды обладают высоким сорбционным потенциалом. Однако решения миграционных задач в равновесной постановке, основанные на «Kd-концепции», могут оказаться недостаточно консервативными по причине пренебрежения гистерезисом сорбции.

В настоящем докладе рассматриваются результаты адсорбционно-десорбционных экспериментов с суспензиями бентонитов – глин, используемых в качестве материалов инженерных барьеров безопасности хранилищ РАО. В основе интерпретации лабораторных экспериментов лежит предпосылка о линейном характере изотерм, получаемых как в процессе сорбции радионуклида на коллоидах, так и в процессе многошаговой десорбции – при последовательной смене радиоактивного раствора в контейнере [2]. Параметрами модели являются коэффициенты, контролирующие гистерезис сорбции: N^{irr} – величина необратимой сорбции, а также парциальные коэффициенты распределения для сорбционных площадок двух типов на коллоидной частице, ответственных за обратимую (*reversible*), K_{12}^{rev} , и необратимую (*irreversible*), K_{12}^{irr} , сорбционные реакции, так что эффективная сорбция описывается «суммарным» коэффициентом:

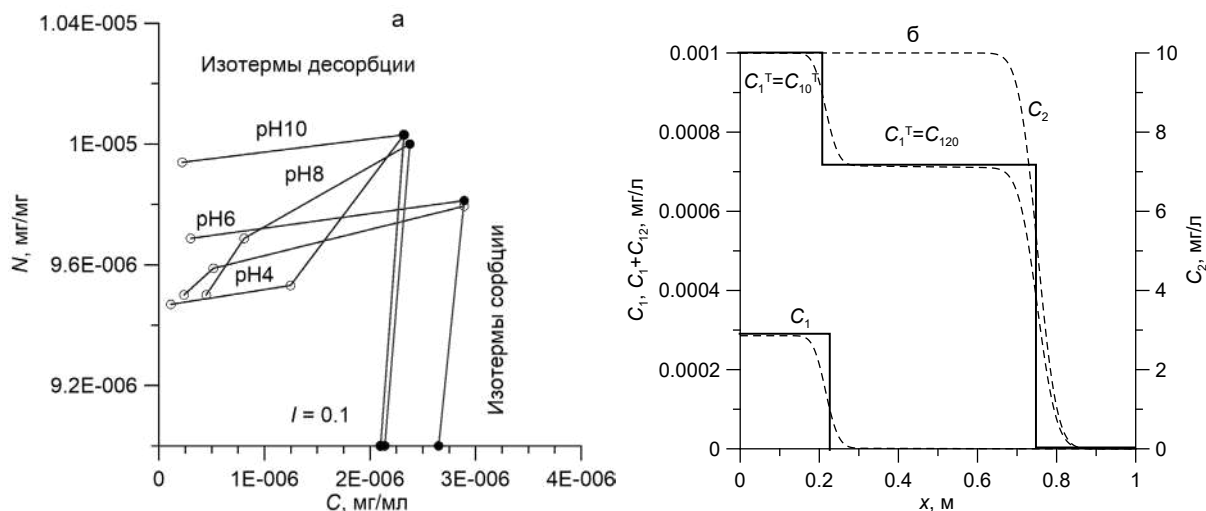
$$K_{12} = fK_{12}^{rev} + (1-f)K_{12}^{irr}, \quad (2)$$

где f – доля площадок, ответственных за обратимую сорбцию, $K_{12} = \rho_b K_{d12}$, ρ_b – плотность породы; индексы 1 и 2 относятся к загрязняющему компоненту и коллоиду. Пример графиков, характеризующих изотермы сорбции – десорбции ($N-C$) америция Am-241 (изотерма десорбции отвечает первому десорбционному шагу) с навесками бентонитовой глины с месторождения «10-й Хутор», представлен на рисунке, а.

На основе данной концепции была разработана аналитическая модель миграции в предпосылке поршневого вытеснения природных вод радиоактивными растворами. Представленная модель позволяет определить значение суммарной концентрации радионуклида на переднем фронте загрязнения, движущегося со скоростью миграции частиц воды, C_{120}^{irr} , т.е. описать «быстрый» транспорт радионуклидов.

Данная модель является частным случаем более общей модели конвективно-дисперсионного переноса, в которой учитывается кинетика сорбции – десорбции вещества на подвижных коллоидах, а решение задачи осуществляется конечно-разностным методом. О хорошей согласованности двух моделей свидетельствует рисунок, б (масштаб лабораторного эксперимента: длина фильтрационной колонки $L = 1$ м, скорость Дарси $v = 0.01$ м/сут, пористость $n = 0.2$, коэффициент дисперсии $D_L = 5 \cdot 10^{-6}$ м²/сут, концентрация радионуклида в источнике $C_{10} = 1 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³, коллоидов $C_{20} = 10$ мг/дм³). Адсорбция компонентов на породе рассматривается как равновесная ($\bar{K}_1 = K_{d1}\rho_b = 0.5$). Для моделирования необратимой сорбции на коллоидах задавалось условие $k_{12}^a \gg k_{12}^d$ (соотношение кинетических констант сорбции и десорбции), однако коэффициент равновесия, контролирующего сорбцию радионуклидов на коллоидах, оставался неизменным, 0.25 л/мг (коэффициент сорбционного

распределения $K_{d12} = 2.5 \cdot 10^5$ см³/г). Сорбционные центры коллоида представлены площадками второго типа, т.е. $f = 0$, сорбцией коллоидов на породе пренебрегалось. Как видно, положение концентрационных фронтов, $C(x)$, рассчитанных на основе двух моделей, практически совпадает, с поправкой на то, что дисперсия приводит к некоторому уменьшению концентрационного контраста между вытесняющим и вытесняемым растворами.



a – изотермы сорбции – десорбции Am-241 при различных рН на сорбционном шаге (ионная сила раствора $I = 0.1$ моль/дм³); здесь C , мг/дм³ – равновесная концентрация Am-241 в растворе; N , мг/мг – количество Am-241, сорбированное на сорбенте (удельная сорбция).

б – влияние гистерезиса сорбции на форму и скорость перемещения концентрационного фронта радионуклида C_1^T ($t = 15$ сут); здесь x , м – координата вдоль колонки (слоя сорбента); C_1 , C_2 , мг/дм³ – концентрации компонентов (форм/фракций) в растворе; $C_1 + C_2$, мг/дм³ – суммарная концентрация. Расчетное время $t = 15$ сут. Сплошные линии – аналитическое решение (модель поршневого вытеснения), пунктирные кривые – численное решение (модель конвективной дисперсии).

Из представленного анализа следует, что в трещиноватых массивах, находящихся выше порога перколяции, формирование связанных высокопроводящих путей существенно усиливает миграционную способность радионуклидов по сравнению с классическими представлениями о фильтрационном переносе. Дополнительный вклад в аномальный транспорт вносит необратимая сорбция радионуклидов на подвижных бентонитовых коллоидах, приводящая к ускоренному переносу загрязняющих компонентов на значительные расстояния. Совместное действие гидродинамических (перколяционных) и физико-химических механизмов должно учитываться при прогнозировании долговременной безопасности пунктов захоронения РАО, в частности на участке Енисейском.

Список литературы

1. Захоронение РАО на участке Енисейский в Красноярском крае: история выбора площадки и современное состояние исследований. М.: Наука, 2024.
2. Румынин В.Г. Геомиграционные модели в гидрогеологии. СПб.: Наука, 2011. 1158 с.
3. Robinson P.C. Connectivity, flow and transport in network models of fractured media // Journal of Physics A: Mathematical and General. 1984. Vol. 17, No. 14. P. 2823–2830.
4. Rubin Y. Applied stochastic hydrogeology. Oxford University Press. 2003. 416 p.

РАДИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ ВОД ВОСТОЧНЫХ РАЙОНОВ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

Дульцев Ф.Ф.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, dultsevff@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе представлены результаты изучения распределения радионуклидов в природных водах восточных районов Новосибирской области. Установлено, что наибольший вклад в природную радиоактивность вносят изотопы калий-40 и члены ряда радия (уран-238 и его продукты распада). Установленная активность калия-40, урана-238, радия-226, радона-222 варьируется в диапазоне от 0 до 85.5, от 0 до 4.3, от 0 до 25.2, от 1 до 1161 Бк/дм³ соответственно. Активность тория-232 на большей части территории исследования не превышает кларковые значения, за исключением вод, приуроченных к западной и северо – западной части Новосибирского гранитоидного массива (пгт. Колывань, с. Скала и сопредельные территории).

Ключевые слова: радиоактивность природных вод, калий, торий, восточные районы Новосибирской области

Abstract. This paper presents an assessment of the radiological hazard associated with natural waters in the eastern part of Novosibirsk Oblast. The primary contributors to natural radioactivity in these waters are ⁴⁰K and members of the ²³⁸U decay series, including ²³⁴U, ²²⁶Ra, ²²²Rn, and other decay products. Measured activities were as follows: ⁴⁰K – 0 to 85.5 Bq/L; ²³⁸U – 0 to 4.3 Bq/L; ²²⁶Ra – 0 to 25.2 Bq/L; and ²²²Rn – 1 to 1.161 Bq/L. Activity levels of thorium – 232 generally clark values, except in waters associated with the western and northwestern parts of the Novosibirsk granitoid massif (Kolyvan, Skala and adjacent areas).

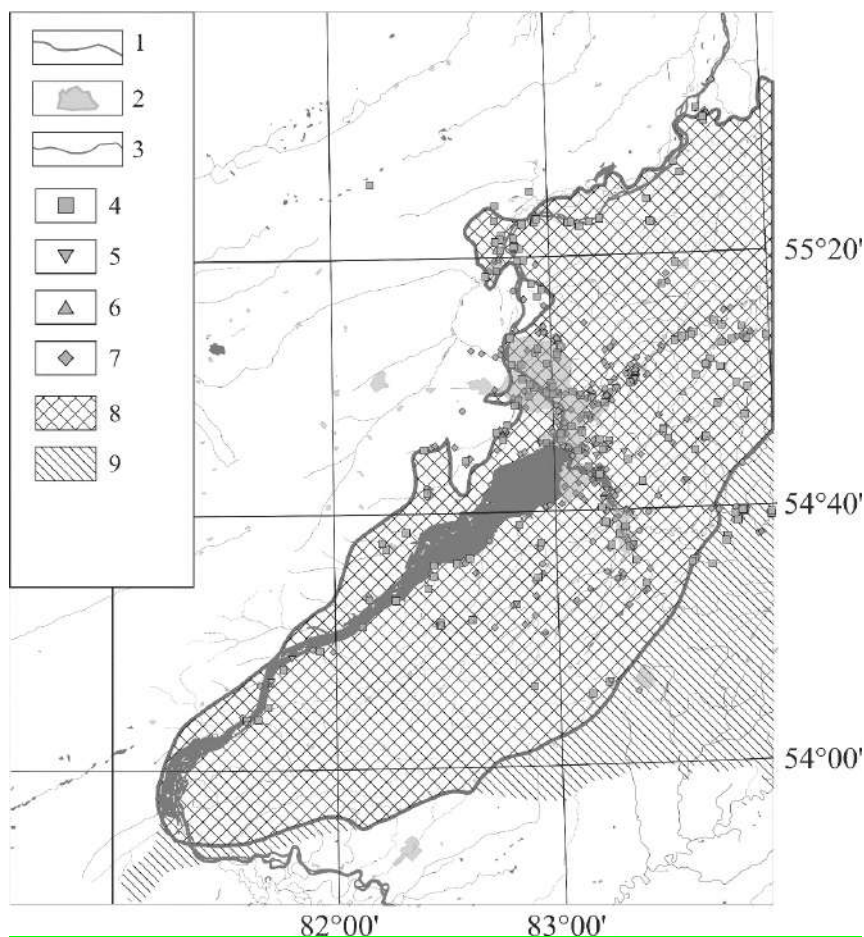
Keywords: radioactivity of natural waters, potassium, thorium, eastern districts of Novosibirsk Oblast

В настоящее время в пределах территории исследования в различных гидрогеологических условиях эксплуатируется множество частных скважин и колодцев со слабо изученным химическим и радиохимическим составом. В сложившейся ситуации возникает опасность использования населением в питьевых целях вод несоответствующего современным требованиям качества. По подземным водам, используемым населением, проживающим в пределах восточных районов Новосибирской области, впервые получены уникальные данные по суммарной α – и β – активности, а также по распределению в них урана-238, тория-232, радия-226, радона-222 и калия-40.

Основой настоящей работы послужили материалы собственных полевых и последующих химико - аналитических исследований, проведенных в период 2018–2025 гг. В пределах восточных районов Новосибирской области было отобрано и изучено 835 проб; помимо этого выполнено обобщение материалов геологических фондов с 1960-х гг. (800 проб).

Для изучения суммарной α – и β – активности природных вод, а также изотопов урана-238, урана- 234, радия- 228, радия-226 отбирались пробы объемом 15 л и подкислялись сверхчистой азотной кислотой. Исследования были выполнены с помощью гамма-спектрометрии и альфа-спектрометрии (после предварительной радиохимической пробоподготовки) в лаборатории геохимии радиоактивных элементов и экогеохимии ИГМ СО РАН.

Изученные природные воды пресные и ультрапресные с величиной общей минерализации от 127 до 1848 мг/дм³, преимущественно HCO₃ Mg- Ca, HCO₃ Na-Mg-Ca и SO₄-HCO₃ Na-Mg-Ca состава. Отмечается закономерный рост содержания основных солеобразующих компонентов (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, NO₃⁻ и SO₄²⁻) с увеличением общей минерализации природных вод [2, 4–6]. Изученные природные воды были разделены на четыре группы: 1) поверхностные, 2) дренажные воды карьеров, 3) родниковые и 4) воды из водозаборных скважин (рисунок).



Распределение величин радиового эквивалента (Ra_{eg}) в природных водах изучаемого региона. Фрагмент Государственной геологической карты и схематический разрез Обь-Зайсанской складчатой области (с упрощением) [Бабин и др., 2015].

1 – реки и озера; 2 – населенные пункты; 3 – Обь-Зайсанская складчатая область; природные воды: 4 – поверхностные; подземные: 5 – родниковые; 6 – дренажные (карьеры); 7 – из водозаборных скважин. 8 – Обь-Зайсанская складчатая область; 9 – Алтае-Саянская складчатая область.

В поверхностных водах (озера и реки) фоновые концентрации урана не превышают ПДК, составляя в среднем 0.002 мг/дм^3 . Превышения ПДК для вод питьевого назначения (0.015 мг/дм^3) зафиксированы в зоне массивов белокурихинского гранит-лейкогранитового комплекса (с. Сенчанка, с. Колывань). Активность урана-238 варьируется от 4×10^4 до 0.67 Бк/дм^3 (среднее 0.03 Бк/дм^3), при этом отношение $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ достигает 1.65. Активность радия-226 изменяется в диапазоне от 1×10^{-4} до 0.7 Бк/дм^3 (среднее значение 0.028 Бк/дм^3), аномально высокие значения приурочены к западной части Обь-Зайсанской области и вероятно, связаны с повышенным содержанием радия в палеоген – неогеновых глинистых отложениях. Активность радона в пробах поверхностных вод достигает 42 Бк/дм^3 . Аномальные превышения ПДК (до 86 Бк/дм^3) отмечены только в зоне Колыванского гранитоидного массива. Природный изотоп калия-40 вносит существенный вклад в общую радиоактивность поверхностных вод. Его концентрация составляет $0.32\text{--}7.70 \text{ мг/дм}^3$, с фоновым значением до 5.7 Бк/дм^3 . Аномально высокие показатели зафиксированы в озере с. Шилово (до 47 Бк/дм^3), вероятно из-за использования удобрений в сельском хозяйстве, и в озере у кирпичного завода в Новосибирске (до 24 Бк/дм^3), что может быть связано с применением карбоната калия. Содержание тория изменяется в пределах от 5×10^{-10} до $8 \times 10^{-8} \text{ г/дм}^3$, что связано с образованием окислов тория и их осаждением из раствора при действии щелочей или аммиака, активность ^{232}Th не превышает 0.3 мБк/дм^3 .

Содержание радиоактивных элементов и физико – химические параметры природных вод северных районов Обь-Зайсанской складчатой области

	TDS	pH	Eh,	активность, Бк/дм ³				
	мг/дм ³		мВ	K ⁴⁰	Rn ²²²	Ra ²²⁶	Th ²³² ×10 ³	U ²³⁸ ×10 ²
I	<u>57... – 1087</u> 445(205)	<u>6,6...–9,5</u> 8(205)	<u>–74...–311</u> 155(205)	<u>1... – 47</u> 6(205)	<u>0... – 86</u> 4(205)	<u>0... – 0,7</u> 0,03(205)	<u>0... – 0,3</u> 0.03(205)	<u>0... – 67,7</u> 3.6(205)
II	<u>320...–1049</u> 561(53)	<u>7,1...–8,3</u> 8(52)	<u>–92...–286</u> 151(52)	<u>0... – 27</u> 3(63)	<u>0... – 130</u> 24(63)	<u>0... – 0,6</u> 0.1(63)	<u>0... – 0,36</u> 0.02(63)	<u>0... – 56,3</u> 5.5(63)
III	<u>93...–789</u> 512(42)	<u>6,2...–8,8</u> 8(41)	<u>8... – 302</u> 179(41)	<u>1... – 27</u> 10(42)	<u>1... – 474</u> 68(35)	<u>0... – 25,2</u> 2.7(42)	<u>0... – 8,7</u> 0.47(35)	<u>0,1... – 2390,6</u> 251.8(42)
IV	<u>171...–1568</u> 636(417)	<u>6,1...–8,4</u> 8(411)	<u>–332...–313</u> 93(411)	<u>0...–85,5</u> 7(427)	<u>0...–1161</u> 67(427)	<u>0... – 4,5</u> 0.3 (427)	<u>0... – 5,85</u> 0.07(282)	<u>0... – 430</u> 24.9(395)

Примечание. TDS – минерализация воды; I – поверхностные; подземные: II – родник/колодец; III – дренажные (карьеры); IV – из водозаборных скважин. Содержания указаны в виде: минимальное – максимальное/среднее значение (количество определений).

Дренажные воды карьеров в восточных районах Новосибирской области изучены в пределах Арбашинского и Маслялинского мраморных карьеров, Новосибирского (карьеры Борок и Горский) и Обского (Новобибеевский карьер) массивов барлакского гранит-лейкогранитового комплекса, Колыванского (карьер Скала) массива белокурихинского гранит-лейкогранитового комплекса, в карьере р.п. Горный, где разрабатывается буготакско-тогучинский риодацит-базальтовый комплекс, а также в некоторых угольных карьерах Искитимского района. Среди изученных карьеров наибольшей активностью всех природных изотопов характеризуется Колыванский массив. Активность родоначальника радиевого ряда урана-238 – изменяется в пределах от 11.6 до 23.9 Бк/дм³, а его дочерние продукты полураспада радий-226 и радон-222 варьируются от 12.1 до 25.2 Бк/дм³ и от 315 до 500 Бк/дм³ соответственно. Активность тория-232 изменяется от 0.02 до 8 Бк/дм³, составляя в среднем 1 Бк/дм³ в пределах карьера. Активность изотопа калий-40 варьируется от 1.4 до 20.7 Бк/дм³ (таблица). Остальные карьеры характеризуются меньшими показателями радиоактивности за исключением некоторых повышенных значений по урану-238 (до 1.5 Бк/дм³, при среднем 0.26 Бк/дм³) в карьере Борок и по калию-40 (до 27 Бк/дм³, при среднем 8.4 Бк/дм³) в карьере Тулинский. Воды характеризуются повышенным соотношением изотопов урана (234 к 238) от 2.2 до 2.9 в пределах Колыванского массива и от 1.6 до 4.6 в карьере р.п. Горный.

Родниковые воды восточных районов Новосибирской области в целом характеризуются самыми низкими значениями радиоактивности. В изученных пробах активность урана-238, радия-226, радона-222 не превышает 0.5, 0.6 и 56 Бк/дм³ соответственно (таблица). Исключение составляют воды Инских источников, разгрузка которых происходит из юргинской свиты, в водах которых концентрация радона достигает 149 Бк/дм³ [1]. Активность калия-40 и тория-232 в пределах территории исследования сохраняется на одном уровне и не превышает 27 Бк/дм³ и 0.4 м Бк/дм³ соответственно. Воды характеризуются повышенным отношением изотопов урана, изменяющимся в диапазоне 1.3–4.6. Подземные воды из водозаборных скважин изучены в зоне распространения магматических тел и в зоне распространения осадочных отложений от каменноугольных до четвертичных. Выборку составили 420 проб. Наибольшие значения активности радионуклидов приурочены к зоне развития Новосибирского, Колыванского и Барлакского массивов (СНТ Аэрофлот-1, СНТ Иня-НАПО, ДНТ Чкаловские просторы, р.п. Колывань), где активность урана-238, радия-226, радона-222 достигает 4, 3, 4, 52 и 1161 Бк/дм³ соответственно. Подземные воды Обского массива характеризуются относительно низкой активностью урана-238, радия-226, радона-222, не превышающей 0.2, 1.6 и 249 Бк/дм³ соответственно, диапазон содержания тория в подземных водах изменяется от 3.8×10⁻⁶ до 2.2×10⁻⁴ Бк/дм³. Характерным отличием зоны контакта Новосибирского массива является повышенная активность тория-232, достигающая 1.2×10⁻³ Бк/дм³. Зоны контакта

Колыванского, Обского и Барлакского массивов (СНТ Обской Садовод, пос. Садовый и др.) характеризуются закономерным снижением содержаний урана-238, радия-226, радона-222, природных радионуклидов до значений 0.05, 0.04 и 40 Бк/дм³ соответственно. Активность изотопов урана-238, радия-226 и радона-222 в подземных водах зоны распространения осадочных комплексов девонского и каменноугольного возраста варьируется в диапазонах 3.3×10^{-5} –0.2, 3.5×10^{-5} –0.2 и 0–120 Бк/дм³ соответственно. Активность изотопа калия-40 в пределах Обь-Зайсанской складчатой области изменяется в широком диапазоне – от 0.4 до 84.5 Бк/дм³. Наибольшие значения получены в зоне распространения Новосибирского и Колыванского массивов. В подземных водах Обского массива среднее значение активности калия-40 составляет 9.4 Бк/дм³, а в зоне распространения осадочных пород снижается до 3.47 Бк/дм³.

Содержание природных радионуклидов изменяется в широком интервале. Наибольшие значения их активности приурочены к зоне развития Новосибирского, Колыванского и Барлакского массивов. Несмотря на близкий химический и радионуклидный состав пород Новосибирского и Обского массивов, подземные воды второго характеризуются более низкими значениями активности урана-238, радия-226, радона-222. Поведение тория в подземных водах зоны распространения интрузивных образований более сложное, его повышенная активность приурочена к зоне распространения Новосибирского массива. Зоны контакта Колыванского, Обского и Барлакского массивов характеризуются закономерным снижением активности урана-238, радия-226, радона-222 до одного уровня с активностью в подземных водах зоны распространения осадочных комплексов девонского и каменноугольного возраста. Повышенные содержания приурочены к зонам разломов в южной части г. Новосибирска, Искитимского, Болотнинского и Мошковского районов Новосибирской области. Наибольшие значения активности изотопа калия-40 приурочены к зоне распространения Новосибирского и Колыванского массивов.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда, проект № 25–17–20024 и правительства Новосибирской области, проект № 30–2025–000896.

Список литературы

1. Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Сухорукова А.Ф., Вакуленко Л.Г., Пыряев А.Н., Максимова А.А., Деркачев А.С., Фаре А.Н., Хвашевская А.А., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В., Мельгунов М.С., Калинин П.Н., Растигеев С.А. Об открытии слаборадоновых вод – Инские источники // Геология и геофизика. 2022. Т. 63, № 12. С. 1714–1732 <http://dx.doi.org/10.15372/gig2021181>.
2. Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Корнеева Т.В., Каменова-Тоцева Р.М., Максимова А.А., Деркачев А.С., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В. Гидрогеология и гидрогеохимия месторождения радоновых вод "Каменское" (г. Новосибирск) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. Т. 332, № 4. С. 192–208 <http://dx.doi.org/10.18799/24131830/2021/04/3162>.
3. Сухоруков В.П., Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Максимова А.А., Яндола Н.И. Петрографические особенности гранитоидов и минералы – концентраторы радиоактивных и редкоземельных элементов Обь-Зайсанской складчатой области // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2024. № 2 (58). С. 86–99.
4. Novikov D.A., Dultsev F.F., Kamenova-Totzeva R., Korneeva T.V. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the ZaeltsovskyMochishche zone of Novosibirsk, Russia // Environmental Earth Sciences C. 1–11 <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-021-09486-w>.
5. Novikov D.A., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F., Maksimova A.A., Chernykh A.V., Derkachyov A.S. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia // Groundwater for Sustainable Development. 15. P. 1–8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100674>.
6. Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Pyraev A.N., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Sukhorukova A.F., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Khvashchevskaya A.A., Kalinkin P.N., Petrozhitsky A.V. Radon – rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia // Groundwater for Sustainable Development. 2023. Vol. 20. P. 1–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100886>.

ОБЛУЧЕНИЕ НАСЕЛЕНИЯ РАСТВОРЕННЫМ РАДОНОМ (НА ПРИМЕРЕ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА)

Завалей В.А.¹, Новиков Д.А.^{1,2}, Турдали Б.¹, Жинак К.¹, Сабденбекова У.¹, Заиров Ж.³

¹КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, Алматы, Республика Казахстан

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск,
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

³ТОО «Viridi Navitas», Астана, Республика Казахстан

Аннотация. На территории исследования распространены преимущественно воды $\text{SO}_4 \text{Ca}$ и $\text{SO}_4 \text{Na}$ состава с величиной общей минерализации от 41 до 62200 мг/дм³, активностью радона от 0.2 до 5500 Бк/дм³ при фоновом значении – 50 Бк/дм³. Суммарная эффективная доза облучения населения составляет от следовых значений до 60.5 мЗв/год (среднее значение 1.5 мЗв/год, опасное значение 5 мЗв/год). Превышение ПДК по радону зафиксировано более чем в 30 % случаев. Его наибольшая активность наблюдается в подземных водах палеозойских, мел-палеогеновых водоносных горизонтов и разновозрастных интрузивов.

Ключевые слова: гидрогеохимия, радон, эффективная доза облучения, оценка радоноопасности, Республика Казахстан

Abstract: Groundwaters over the territory under investigation are mainly of $\text{SO}_4 \text{Ca}$ and $\text{SO}_4 \text{Na}$ types with TDS varying from 41 to 62200 mg/L, radon activity varies from 0.2 to 5500 Bq/L, while the background value is 50 Bq/L. The total effective public exposure dose varies from trace values to 60.5 mZv/year (the average value is 1.5 mZv/year, hazardous level is 5 mZv/year). The maximum permissible concentration of radon has been determined to be exceeded in more than 30 % of cases. Its highest activity is observed in the groundwaters of Paleozoic, Cretaceous–Paleogene aquifers and age-diverse intrusions.

Keywords: hydrogeochemistry, radon, effective exposure dose, radon hazard assessment, the Republic of Kazakhstan

Для целей питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения должны использоваться поверхностные и подземные водные объекты, защищенные от загрязнения и засорения, причем их пригодность определяется на основании санитарно-эпидемиологических заключений. Согласно оценкам Научного комитета ООН по воздействию атомной радиации (UNSCEAR), более 98 % дозы облучения населения приходится на природные источники радиации, что обуславливает повышенный интерес научного сообщества к радиологическому качеству питьевой воды.

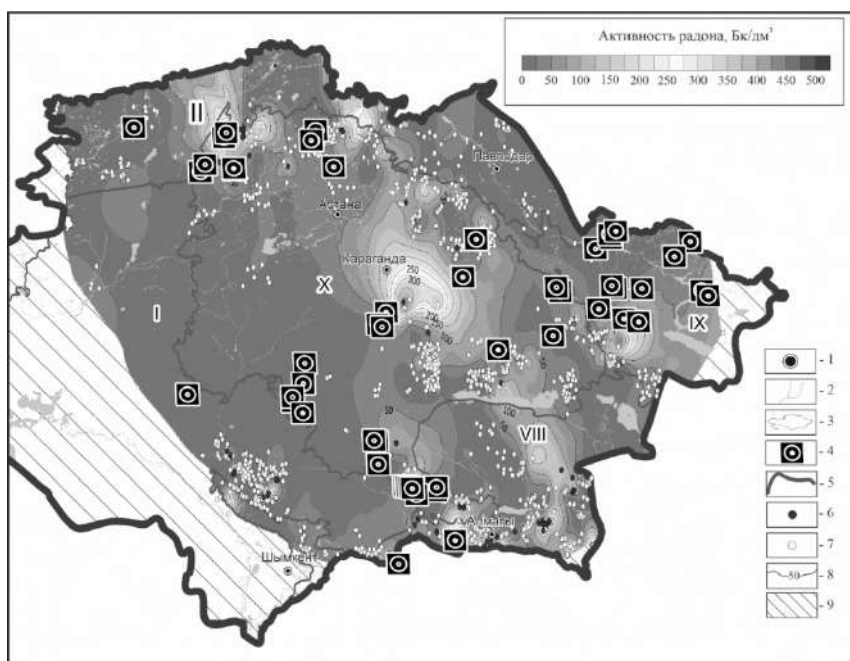
Исследования активности радона в природных водах, включая питьевые и минеральные, активно проводятся во многих регионах мира, в том числе в США, России, странах Европы и Азиатско-Тихоокеанского региона. Концентрации ^{222}Rn в воде могут варьироваться от 1 до 100000 Бк/дм³, при этом, наряду с регионами с низкими фоновыми значениями, встречаются области с аномально высокой активностью, например в Бразилии, Индии, Канаде, Турции, Иране и др. [2, 6, 8, 9]. В прилегающих районах Российской Федерации выявлено множество месторождений и проявлений радоновых вод с активностью ^{222}Rn от 2 до 25220 Бк/дм³ [3, 11].

В восточных регионах Республики Казахстан радиоактивность вод в основном обусловлена наличием радиоактивных минералов в гранитоидных массивах различного возраста [4], что подтверждается открытием целой серии урановых месторождений (Грачевское, Алутау, Юбилейное и др.) в ходе масштабных поисковых работ, начатых еще в середине прошлого века. Радон-222 – бесцветный радиоактивный инертный газ, продукт распада урана, легко растворяется в подземных водах зон эндо- и экзогенной трещиноватости гранитоидных массивов и не мигрирует на большие расстояния от эманлирующего коллектора. В процессе наших более ранних работ установлено, что именно взаимодействие в системе вода – горная порода определяет степень насыщения подземных вод радоном.

Особую значимость проблема радиоактивности вод приобретает в населенных пунктах, где подземные воды используются для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения. Кроме того, во многих частных домовладениях для водоснабжения

используются собственные скважины. В процессе бытового использования подземных вод радон переходит в воздух помещений, что приводит к увеличению его концентрации в жилых и рабочих пространствах. Наибольшую опасность для здоровья человека радон представляет при вдыхании (ингаляционное поступление), поскольку продукты его распада, задерживаясь в дыхательных путях, оказывают ионизирующее воздействие на клетки легочной ткани, что увеличивает риск развития рака легких. Пероральное поступление радона с водой или пищей менее опасно, однако также вносит определенный вклад в общую дозу, получаемую человеком. В настоящем исследовании проведена количественная оценка вклада радона, поступающего в помещения вместе с подземными водами, в годовую эффективную дозу облучения населения от природных источников радиации с учетом его ингаляционного и перорального поступления в организм. Полученные данные позволяют оценить степень риска для здоровья населения, связанного с использованием обогащенных радоном подземных вод восточных районов Республики Казахстан, и обосновать необходимость мониторинга и контроля содержания этого радионуклида в системах водоснабжения.

В основу исследования положены результаты ретроспективных (АО «Волковгеология») и собственных определений активности радона в подземных водах, отобранных из родников и водозаборных скважин во время полевых работ 2025 г. Отбор воды производился в полиэтиленовую тару, а определение концентрации ^{222}Rn осуществлялось на альфа-радиометре «Альфарад +» не позднее 2 сут после отбора проб. Размер общей геохимической выборки по подземным водам Республики Казахстан представлен данными по 3630 пробам. Для последующего анализа в работе использовано 777 проб, в которых была замерена величина активности радона (рисунок). При расчете эффективной дозы учитывалось и пероральное, и ингаляционное поступление радона в организм. Полученные данные были нанесены на карту.



Карта активности радона в подземных водах.

- 1 – населенные пункты; 2 – гидросеть; 3 – границы Республики Казахстан; 4 – месторождения урана; 5 – границы гидрогеологических регионов; 6 – активность радона выше 500 Бк/дм³; 7 – точки опробования радона; 8 – изолинии равных концентраций радона, Бк/дм³; 9 – отсутствие данных. Гидрогеологические регионы (по [8]):
 I – Скифско-Туранский, II – Западно-Сибирский, III – Восточно-Европейский,
 VIII – Жетысу-Алатау-Тянь-Шаньский, IX – Енисей-Саяно-Алтайский,
 X – Центрально-Казахстанский, XI – Таймыро-Уральский.

Для расчетов применялись формулы, приведенные в работе А.В. Калайдо с соавторами [5], в которых учитываются различные параметры, влияющие на величину эффективной дозы. Так, формула расчета эффективной дозы, получаемой при ингаляционном воздействии радона (E_{inh} , мЗв/год), высвободившегося из воды при ее использовании, имеет вид:

$$E_{inh} = DCF \left(\frac{C_w Q_w T}{V n} \right) F t,$$

где DCF – дозовый коэффициент для ингаляции радона ($9 \cdot 10^{-9}$ Зв/(Бк·ч·м⁻³)); C_w – концентрация радона в воде, замеренная в ходе лабораторных исследований, Бк/дм³; Q_w – расход воды в сутки, л/сут (принят равным 500 дм³/сут для семьи из трех человек); T – коэффициент перехода радона из воды в воздух (обычно 0.1); V – объем помещения, м³ (принят равным 208 м³ при допущении средней площади жилых строений – 80 м², средней высоте потолков – 2.6 м; n – кратность воздухообмена, 1/сут; F – фактор равновесия радона в воздухе (принят равным 0.4); t – время пребывания в помещении, 6000 ч/год) [5].

Формула для расчета эффективной дозы за год, полученной при употреблении воды в пищу (пероральное поступление) (E_{ing} , мЗв/год), имеет вид:

$$E_{ing} = DCF \cdot C \cdot V,$$

где DCF – дозовый коэффициент, Зв/Бк (рекомендованное значение для перорального поступления радона $3.5 \cdot 10^{-9}$ Зв/Бк) [6]; C – среднегодовая концентрация радона в воде, Бк/дм³; V – годовой объем потребляемой воды, дм³/год (принят равным 730 дм³/год из расчета 2 дм³/сут) [10]. Для оценки воздействия радона на здоровье населения использовалась суммарная эффективная доза, равная $E_{inh} + E_{ing}$.

Согласно результатам мониторинга, в пределах Жетысу-Алатау-Тянь-Шаньского гидрогеологического региона активность радона изменяется в значительных пределах: от 2 до 5098 Бк/дм³ со средним значением 230 Бк/дм³. Наименьшая активность радона отмечается в Енисей-Саяно-Алтайском регионе и составляет от 3.7 до 400.5 Бк/дм³ (в среднем 40.3 Бк/дм³). В Скифско-Туранском регионе активность радона составляет от 0.2 до 5400 Бк/дм³ со средним значением 124 Бк/дм³, а в Центрально-Казахстанском – от 0.3 до 5550 (в среднем 106 Бк/дм³). Рассчитанная фоновая активность радона для района исследования составляет 50 Бк/дм³, что не превышает уровень реагирования, тем не менее превышение ПДК зафиксировано более чем в 30 % проб. Анализ приведенных данных свидетельствует о наличии районов с существенным превышением допустимых уровней радона в подземных водах, что хорошо видно на рисунке, где зафиксированы экстремально высокие концентрации. Максимальная активность радона (до 5000 Бк/дм³) наблюдается в подземных водах нерасчлененных палеозойских, мел-палеогеновых и магматических пород.

Согласно расчетам, для 88 % объектов эффективная годовая доза от природных источников не превышает среднемирового значения (2.4 мЗв). Однако для 5 % из изученных объектов эффективная доза облучения составляет более 5 мЗв/год и достигает значений в 50–60 мЗв/год, что говорит об опасности употребления воды из этих источников, требует немедленного принятия мер по улучшению радиационной обстановки и постановки регулярного мониторинга источника воды. Такие значительные превышения эффективной дозы (при активности радона более 4000 Бк/дм³) наблюдаются в роднике и скважине близ с. Аксуек в Мойынкумском районе Жамбылской области Казахстана, а также в скважинах и родниках Созакского района Туркестанской области. Следует принимать во внимание, что радон в воде не является единственным природным источником ионизирующего излучения: существенный вклад вносит поступление радона с почвенным воздухом, гамма-излучение непосредственно от пород, некоторых строительных материалов и другие природные источники.

Исследования финансируются Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP26195333 «Минеральные воды Жетысу-Алатау-Балхашского бассейна: изотопно-геохимические особенности, механизмы формирования и бальнеологическая ценность»).

Список литературы:

1. Атлас гидрогеологических карт Республики Казахстан. Алматы: ТОО «А–Три–Принт», 2022. 85 с.
2. Калайдо А.В., Римшин В.И., Сулейманова Л.А., Никитин А.А. Оценка мощности источников поступления радона в воздух зданий различной конструкции в течение жизненного // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15, № 5. URL: <https://esj.today/PDF/41SAVN523.pdf>.
3. Abu-Khader M.M., Shawaqfeh A.T., Naddaf Z., Maity J.P., Bhattacharya P. Radon in the groundwater in the Amman–Zarqa Basin and related environments in Jordan // Groundwater for Sustainable Development. 2018. Vol. 7. P. 73–81. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.03.009>.
4. Bertolo A., Bigliotto C. Radon concentration in waters of geothermal Euganean basin–Veneto, Italy // Radiat. Prot. Dosim. 2004. Vol. 111(4). P. 355–358. URL: <https://doi.org/10.1093/rpd/nch053>.
5. Bem H., Plota U., Staniszewska M., et al. Radon (^{222}Rn) in underground drinking water supplies of the Southern Greater Poland Region // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2014. Vol. 299. N. 3. P. 1307–1312.
6. Böhm C. Radon im Wasser–Überblick für den Kanton Graubünden // Jahresbericht Naturforschende Gesellschaft Graubünden, 2002. Vol. 111. P. 49–79. URL: <https://doi.org/10.5169/seals-594820>.
7. Chaudhuri H., Nisith K.D., Bhandari R.K., Sen P., Sinh B. Radon activity measurements around Bakreswar thermal springs // Radiat. Meas. 2010. Vol. 45. P. 143–146. URL: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.11.039>.
8. Medeshova N.A., Novikov D.A., Zhinak K.O., Makyzhanova A.T., Zapparov M.R., Orynbeke A.M., Dultsev F.F. Uranium in the groundwaters of the Republic of Kazakhstan // Groundwater for Sustainable Development. 2025. Vol. 31.
9. Novikov D.A., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F., Maksimova A.A., Chernykh A.V., Derkachyov A.S. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia // Groundwater for Sustainable Development. 2021. Vol. 15, N. 11. 100674. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100674>.
10. Novikov D.A., Khvaschevskaya A.A., Kopylova Y.G., Pyryaev A.N., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Purgina D.V. Hydrogeochemistry and stable isotopes in radon–rich thermal waters of Belokurikha (Altai, Russia) // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29. P. 83081–83098.
11. ICRP Publication 119: Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60 // ICRP. (2012). URL: <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20119> (дата обращения: 11.02.2026).

КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГРАФИЧЕСКОЙ СЕТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАЩИЩЕННОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Козлов Ю.А., Егоров Т.С.
ФГБУ «Гидроспецгеология», Москва, kozloviurii@mail.ru

Аннотация. Предложена методика количественной оценки вероятности формирования сквозных таликов как ключевого фактора, определяющего защищенность подземных вод от поверхностного загрязнения в условиях распространения многолетнемерзлых пород. Приведен алгоритм обработки спутниковых данных, включающий построение бинарного раstra водной поверхности, отбор водных объектов по пороговому значению радиуса и агрегацию результатов в матрицу с расчетом процентного покрытия водной поверхностью для каждой ячейки. Получена количественная характеристика, отражающая вероятность существования гидрогенных подоцерных сквозных таликов, пригодная для использования в качестве входного параметра в индексно-рейтинговых методах оценки защищенности подземных вод.

Ключевые слова: подземные воды, защищенность подземных вод, многолетнемерзлые породы, сквозные талики

Abstract. A methodology for quantitative assessment of the probability of talik formation as a key factor determining the vulnerability of groundwater to surface contamination under permafrost conditions is proposed. An algorithm for processing satellite data is presented, including the construction of a binary raster of water surface, selection of water bodies based on a threshold radius value, and aggregation of results into a matrix with calculation of the percentage of water surface coverage for each cell. A quantitative characteristic reflecting the probability of existence of hydrogenic sublake taliks has been obtained, suitable for use as an input parameter in index-rating methods for assessing groundwater vulnerability.

Keywords: groundwater, groundwater vulnerability, permafrost, taliks

Около пяти миллионов человек проживает в Арктической зоне на территории распространения многолетнемерзлых пород (ММП), из них около трех миллионов – на территориях, где ММП деградирует или исчезнет к 2050 г. [5]. Доступ населения к постоянным и устойчивым к загрязнению источникам водоснабжения является основой для социально-экономического развития Арктической зоны, создания новых населенных пунктов, объектов транспортной инфраструктуры и промышленности. При этом не разработано общепризнанных методик оценки защищенности подземных вод от поверхностного загрязнения, учитывающих особенности мерзлотно-гидрогеологических условий и динамики их изменения во времени в региональном масштабе. В настоящей работе предложен подход к оценке одного из ключевых факторов, определяющих защищенность подземных вод от поверхностного загрязнения на арктических территориях, – пространственного распространения сквозных таликов.

Современные методы оценки защищенности подземных вод принято классифицировать на три группы [3]: качественные индексно-рейтинговые методы, количественные статистические методы, количественные методы моделирования. Каждый метод обладает определенными преимуществами и ограничениями и может быть эффективно применен в зависимости от целей исследования, объема и качества исходных данных, а также специфики гидрогеологических условий изучаемой территории.

Специфика мерзлотно-гидрогеологических условий в зоне распространения ММП обусловлена необходимостью учета защитной функции не только литологических, но и мерзлотных водоупоров. В отличие от южных регионов, в арктических территориях криогенные барьеры в виде толщи ММП играют ключевую роль в ограничении миграции загрязняющих веществ от поверхности к водоносным горизонтам.

В условиях распространения ММП сквозные талики формируют гидрогеологические окна, создающие прямые пути миграции загрязняющих веществ от поверхности к подземным водам и тем самым снижающие их защищенность от поверхностного загрязнения. Одними из наиболее распространенных типов таликов являются гидрогенные подоцерные талики, существование которых обусловлено отепляющим влиянием поверхностных водных объектов на температурный режим горных пород [1]. Целью

настоящей работы стало выявление и картографирование в региональном масштабе поверхностных водоемов, под которыми формируются сквозные талики.

Для определения пространственного распространения сквозных таликов необходимо определить, под какими поверхностными водоемами они формируются. Конфигурация таликов определяется совокупностью геологических, криолитологических и климатических факторов территории. Вместе с тем для региональных оценок целесообразно выделить устойчивые закономерности, позволяющие проводить прогнозирование на основе ограниченного набора параметров.

Согласно результатам исследований [2], радиус озера оказывает существенное влияние на форму и мощность подоцерного талика. При радиусе поверхностного водоема порядка 120 м под ним с высокой вероятностью формируется сквозной талик. Указанное пороговое значение носит условный характер и может варьироваться в зависимости от локальных мерзлотно-гидрогеологических условий. Тем не менее для целей региональной оценки оно может быть использовано в качестве ориентировочного критерия.

В качестве модельного участка для апробации предложенного подхода выбрана территория п-ова Ямал в границах номенклатурного листа масштаба 1:1 000 000 R-42 (43). Данная территория сильно заозерена, для нее имеются актуальные комплекты геологических и гидрогеологических карт, обеспечивающие необходимую информационную основу для анализа.

В качестве источника данных о современном распространении поверхностных водных объектов использованы актуальные спектрзональные снимки Landsat с пространственным разрешением 30 м [4]. Исходные материалы обработаны в среде программирования RStudio, в результате получено бинарное растровое изображение, в котором пиксели, соответствующие водной поверхности с вероятностью 70–100 %, закодированы значением, условно отображаемым черным цветом. На следующем этапе из бинарного растра исключены водные объекты с радиусом менее 120 м, что соответствует площади 45.2 тыс. м².

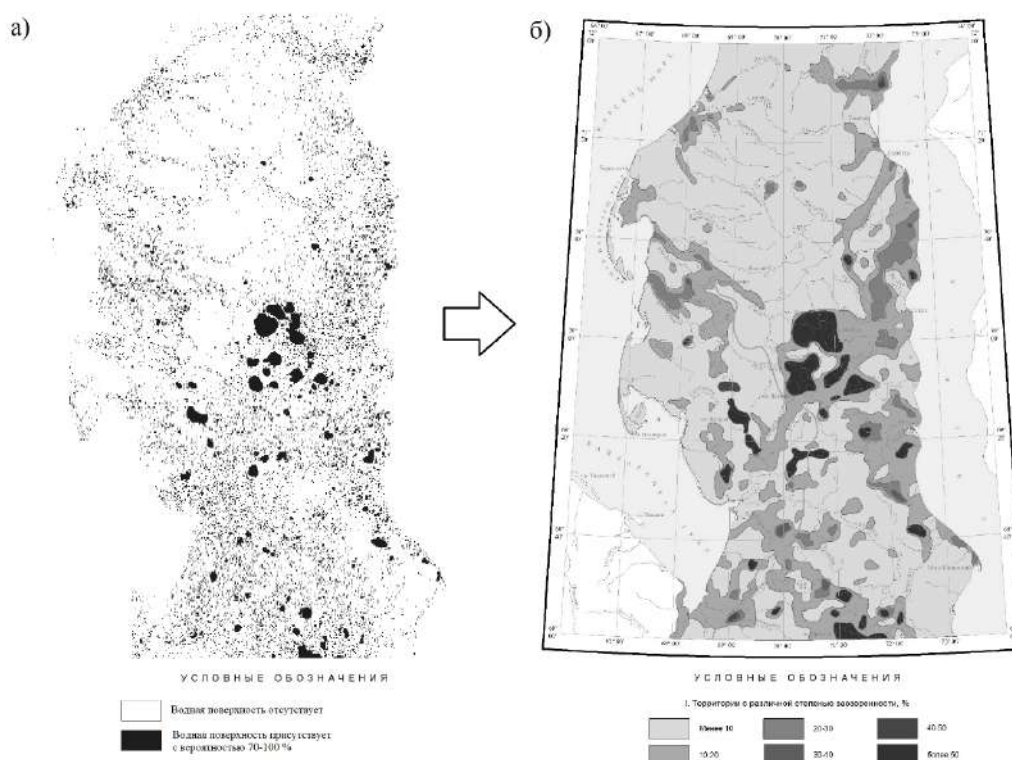
Полученное изображение разбито на матрицу ячеек заданного размера. Для каждой ячейки рассчитана доля площади, занятой водными объектами. На основе этих расчетов построена схема заозерности территории с классификацией по интервалам процентного покрытия водной поверхностью (рисунок).

Таким образом осуществлен переход от качественного описания к количественной характеристике, отражающей вероятность формирования сквозных таликов на исследуемой территории. Полученный показатель может быть использован в качестве входного параметра при оценке степени защищенности подземных вод в рамках индексно-рейтинговых методов для территорий распространения ММП.

В работе предложен методологический подход к количественной оценке одного из ключевых факторов, определяющих защищенность подземных вод от поверхностного загрязнения в условиях распространения ММП, – пространственного распространения сквозных таликов. Спутниковые данные Landsat адаптированы к задачам мерзлотной гидрогеологии и разработке алгоритма перехода от визуального выявления водных объектов к количественному показателю вероятности формирования сквозных таликов.

Использование порогового критерия радиуса озера (≥ 120 м), соответствующего вероятности формирования сквозного талика, позволило на основе бинарной классификации водной поверхности построить схему заозеренности с градацией по процентному покрытию для территории исследования. Полученный показатель представляет собой пространственно распределенную количественную характеристику, отражающую потенциальную уязвимость подземных вод к проникновению загрязняющих веществ через гидрогенные подоцерные талики. Оценка степени защищенности подземных вод индексно-рейтинговым методом выполняется с учетом совокупности факторов, каждому из которых посредством экспертной оценки присваивается значение в баллах и весовой коэффициент. На исследуемой территории ключевым фактором оценки защищенности выступает пространственное

распределение сквозных таликов, определяемое по схеме заозеренности. Кроме того, учитываются мощность и фильтрационные свойства перекрывающих отложений, соотношение напоров изучаемого и вышележащего водоносного горизонтов и прочие факторы, определяющие вероятность миграции загрязняющих веществ с поверхности.



Интерпретация бинарного растра (а) в схему заозеренности (б).

Предложенный подход может быть применим для решения аналогичных задач в региональном масштабе, ограничением является ориентация на подозрительные талики. Вопрос количественной оценки гидрогенных подрусловых таликов требует дальнейшей проработки с привлечением дополнительных параметров речных систем. Еще одним ограничением, обусловленным дефицитом фактических данных, является отсутствие учета глубины озер. В связи с этим принято допущение: если озеро удовлетворяет критерию по радиусу, его глубина считается достаточной для формирования под ним сквозного талика. Перспективы исследований связаны с расширением методики на другие типы таликов; расширением перечня пороговых критериев озер, под которыми возможно формирование сквозных таликов; учетом динамики развития таликов во времени на основе мультитременных спутниковых данных и дальнейшей ее апробацией на других территориях.

Список литературы

1. Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны / Под ред. В.А. Всеволожского. М.: Изд-во МГУ, 1983. 231 с.
2. Khimenkov A.N., Sergeev D.O., Stanilovskaya J.V., Vlasov A.N., Volkov-Bogorodsky D.B., Merzlyakov V.P., Tipenko G.S. Structural reorganizations in frozen grounds within the gas emission crater formation // Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering. Springer International Publishing, 2019. P. 305–316.
3. Machiwal D., Jha M.K., Singh V.P., Mohan C. Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: current status and challenges // Earth-Sci. Rev. 2018. Vol. 185. P. 901–927.
4. Potapov P., Hansen MC., Pickens A., Hernandez-Serna A., Tyukavina A., Turubanova S., Zalles V., Li X., Khan A., Stolle F., Harris N., Song X., Baggett A., Kommareddy I., Kommareddy A. The Global 2000-2020 Land Cover and Land Use Change Dataset Derived From the Landsat Archive: First Results // Front. Remote Sens 3:856903, 2022.
5. Ramage J., Jungsberg L., Wang S., Westermann S., Lantuit H., Heleniak T. Population living on permafrost in the Arctic // Popul. Environ. 2021. P. 22–38.

РОЛЬ РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ЗАГРЯЗНЕНИИ ПИТЬЕВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Новиков Д.А.

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск,
NovikovDA@ipgg.sbras.ru*

Аннотация. Приводятся данные по распределению растворенных органических веществ в подземных водах хозяйственно-питьевого назначения в пределах южных районов Западной Сибири. Установлено, что в изученных подземных водах содержание общего органического углерода ($C_{орг}$), который присутствует в подземных водах в виде органических соединений в растворенном и нерастворенном состоянии, составляет от 0.06 до 87.6 мг/дм³. Его максимальные концентрации (>50 мг/дм³) зафиксированы в подземных водах девонско-каменноугольного возраста. В 57 % изученных проб содержание $C_{орг}$ превышает предельно допустимые концентрации в два раза и более.

Ключевые слова: *растворенное органическое вещество, гидрогеохимия, загрязнение, питьевые подземные воды, Новосибирская область, юг Западной Сибири*

Abstract: The data on the distribution of dissolved organic substances in the groundwaters for household and drinking purposes within the southern regions of Western Siberia are presented. The content of total organic carbon, which is present in groundwaters in the dissolved and non-dissolved states, was determined to vary from 0.06 to 87.60 mg/L. Its maximal concentrations (>50 mg/L) were detected in the groundwaters of the Devonian-Carboniferous age. In 57 % of the studied samples, total organic carbon content exceeds the maximum permissible concentrations by a factor of 2 and more.

Keywords: *dissolved organic matter, hydrogeochemistry, pollution, drinking groundwaters, the Novosibirsk Region, the southern regions of Western Siberia*

Высокие концентрации растворенных органических веществ (РОВ) в источниках питьевой воды представляют собой серьезную проблему для водоподготовки, что требует совершенствования технологий очистки. В первую очередь они оказывают влияние на органолептические свойства подземных вод (цвет, запах и вкус), делая их непригодными в питьевых целях. Увеличение РОВ в водах неглубоко залегающих водоносных горизонтов связано с климатическими (потепление, экстремальные погодные явления) и неклиматическими (антропогенная деятельность, увеличение концентрации CO_2 в атмосфере) факторами, однако наиболее часто – с климатическими. Традиционные методы очистки воды находятся на пределе своих возможностей по удалению высокого содержания РОВ, гидрофильных соединений и новых загрязняющих веществ, таких как фармацевтические препараты и т. д. [16].

О важности изучения РОВ еще в 1930-е гг. писал В.И. Вернадский: «Органические вещества минеральных вод в буквальном смысле terra incognita. Несмотря на их малые количества, значение их – бальнеологическое – может быть огромно. Оно должно быть огромно и в геохимическом эффекте» [4]. Согласно В.М. Швецу [10] среднее содержание $C_{орг}$ в различных типах подземных вод варьируется в очень широком диапазоне. Так, максимально оно (до 800 мг/дм³) в водах нефтегазовых месторождений), а минимально (до 25 мг/дм³) – в грунтовых водах аридных областей. Среди последних работ, связанных с изучением водорастворенного РОВ (ВРОВ) в различных геохимических типах природных вод Сибири, следует упомянуть исследования [3, 6, 7, 9].

При оценке качества подземных вод хозяйственно-питьевого назначения обычно необходимо знать, сколько органических веществ содержится в этих водах. Их общее количество оценивается концентрацией $C_{орг}$, а приблизительно – значением перманганатной окисляемости (ПО), основанной на окислении органических веществ, присутствующих в воде, перманганатом калия $KMnO_4$ в сернокислой среде [5]. Согласно действующим в Российской Федерации нормативным документам предельно допустимые концентрации (ПДК) для питьевых вод для $C_{орг}$ составляют 5 мг/дм³, для ПО – 5 мг O /дм³ [8]. Процессы водоподготовки (хлорирование, озонирование и т. д.) могут приводить к образованию в водах, обогащенных РОВ, потенциально вредных побочных продуктов, представляющих

огромную опасность для здоровья человека из-за их мутагенной, канцерогенной и репродуктивной токсичности [11, 17]. В связи с этим цель настоящего исследования – изучение распределения РОВ в питьевых подземных водах восточных районов Новосибирской области, которое продолжает наши работы по этому региону [12–15].

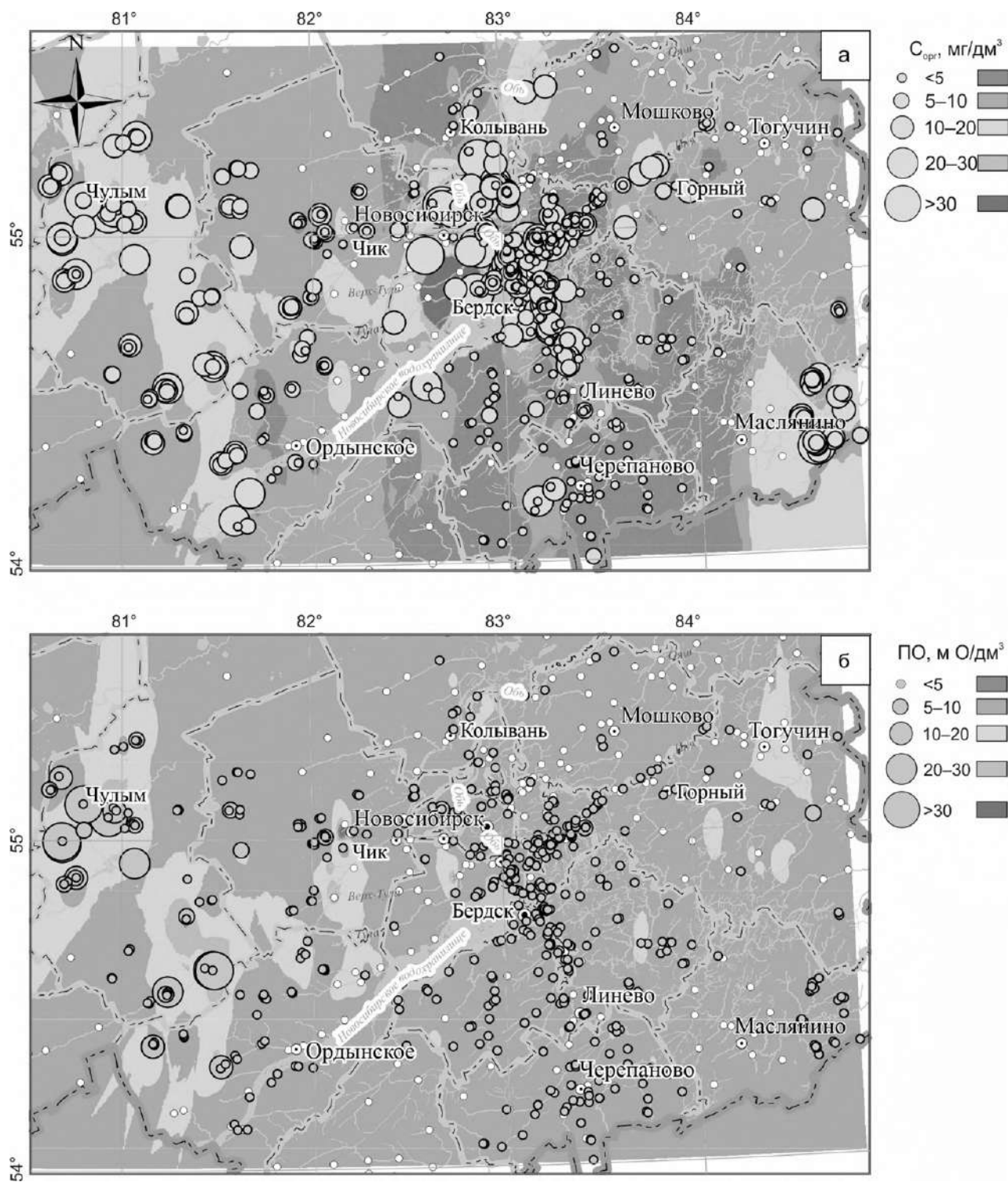
Во время экспедиционных работ 2019–2025 гг. и последующих аналитических исследований в лабораториях ИНГГ СО РАН и ПНИЛ гидрогеохимии ТПУ получен уникальный фактический материал по химическому составу 794 проб подземных вод, в разной степени обогащенных РОВ, отобранных в контрастных гидрогеологических условиях гранитоидных массивов, зон контактов и разновозрастных осадочных комплексов в южных районах Западной Сибири. Исследуемая территория в гидрогеологическом плане находится на стыке Иртыш-Обского артезианского бассейна (АБ) и Кузнецкой гидрогеологической складчатой области (ГСО), граница между которыми условно проводится по долине р. Обь.

Все содержащиеся в подземных водах органические вещества в той или иной степени участвуют в био- и геохимических процессах. М.Е. Альтовский отметил среди них гидролиз клетчатки и гумуса, поликонденсацию гуминовых и других органических кислот, каталитическую гидрогенизацию аминокислот, декарбоксилирование карбоновых кислот и др. [1]. В последние годы ужесточились требования к оценке безопасности питьевых вод, что связано с их прогрессирующим загрязнением, в том числе высокотоксичными органическими компонентами. В настоящее время, согласно данным ВОЗ, в промышленности используется около 500 тыс. органических соединений, из которых более 40 тыс. являются вредными для здоровья человека и 12 тыс. – токсичными [2]. Изучаемые воды были разделены на восемь групп в соответствии с возрастом водовмещающих отложений (таблица). В изученных подземных водах содержание $C_{\text{общ}}$ изменяется от 14.7 до 202.0 мг/дм³ и максимально в водах юрских отложений, $C_{\text{неорг}}$ – от 12–191 мг/дм³. $C_{\text{орг}}$ присутствует в подземных водах в виде органических соединений в растворенном и нерастворенном состоянии, его концентрация 0.06–87.60 мг/дм³, максимальная (>50 мг/дм³) зафиксирована в подземных водах девонско-каменноугольного возраста. Анализ рассчитанных кумулятивных кривых для концентраций $C_{\text{орг}}$ и ПО показал, что лишь в 15 % изученных проб содержания $C_{\text{орг}}$ не превышают ПДК, а в 57 % проб превышают ПДК в два раза и более. Резко отличается картина по перманганатной окисляемости: меньшая часть исследованных проб (41.5 %) превышает ПДК, однако в отдельных пробах – в пять раз и более. Латеральная зональность в распределении РОВ носит весьма сложный характер (рисунок).

Распределение РОВ в подземных водах юга Западной Сибири

Возраст водовмещающих отложений		M*, мг/дм ³	pH	Eh, мВ	Собщ	Сорг,	Снеорг	ПО, мгО/дм ³
					мг/дм ³			
Є–О		<u>93.4–925</u> 555(45)	<u>7–8.4</u> 7.5(45)	<u>–141–(+304)</u> 109.5(45)	<u>23.2–77</u> 61.5(16)	<u>1.2–12.5</u> 5.2(45)	<u>15.9–66.1</u> 52.3(16)	<u>0.08–3.1</u> 0.9(45)
D–C		<u>171–1492</u> 627(407)	<u>6.7–8.7</u> 7.5(407)	<u>–150.4–(+306)</u> 108.3(394)	<u>14.7–153</u> 80.2(147)	<u>0.06–87.6</u> 7.2(407)	<u>12–113</u> 66.35(147)	<u>0.08–5.9</u> 0.9(406)
J		1326	8.41	246.2	202	10.2	191	5.1
P		<u>471–761</u> 612(3)	<u>7.5–8.1</u> 7.7(3)	<u>83–177.5</u> 126(3)	н/д	<u>2–2.42</u> 2.3(3)	н/д	<u>0.26–1.0</u> 0.65(3)
N		<u>472–2905</u> 1242(88)	<u>7.3–8.9</u> 7.7(88)	<u>–173–(+270)</u> 23.6(79)	н/д	<u>1.8–46.2</u> 9.4(88)	н/д	<u>0.5–32.0</u> 5(88)
Ингузии	D	<u>198–694</u> 472(3)	<u>7.2–8</u> 7.5(3)	<u>178–227</u> 202.35(2)	<u>21.9–49.9</u> 38.9(3)	<u>0.53–6.4</u> 3.34(3)	<u>21.4–43.6</u> 35.6(3)	<u>0.16–3.5</u> 1.31(3)
	C	<u>552–596</u> 574(2)	<u>7.07–7.3</u> 7.2(2)	<u>237.6–313</u> 275.3(2)	<u>69.9–81</u> 75.5(2)	<u>9.9–15.7</u> 12.8(2)	<u>60–65.5</u> 62.7(2)	<u>0.08–0.82</u> 0.45(2)
	P–T	<u>105–1339</u> 706(46)	<u>6.2–8.33</u> 7.6(46)	<u>–148–(+289)</u> 109(46)	<u>68.4–114</u> 89(16)	<u>0.79–25.6</u> 8.3(46)	<u>58.3–92</u> 73(16)	<u>0.08–4.8</u> 1.2(46)

Примечание. В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее, в скобках – количество определений. M* – общая минерализация подземных вод; н/д – нет данных.



Распределение РОВ (а) и ПО (б) в подземных водах южных районов Западной Сибири.

Максимальный уровень загрязнения $C_{орг}$ в пределах исследуемой территории наблюдается на территории Новосибирска и Новосибирского района (рисунок). Здесь зафиксированы наиболее значительные превышения ПДК. Так, в пос. Междуречье концентрация $C_{орг}$ достигает 87.6 мг/дм^3 , что почти в 18 раз выше установленной нормы. Превышения ПДК носят повсеместный характер во всех районах города, наиболее высокие ($C_{орг} > 30 \text{ мг/дм}^3$) выявлены в селах Алексеевка, Ленинское, Криводановка, Новолуговое, поселках Междуречье, Красный Яр, СНТ «Звездное» и д/о «Хуторок». Второе место по степени загрязнения органическим веществом занимает Чулымский район: зафиксированная максимальная концентрация $C_{орг}$ — 46.2 мг/дм^3 . Анализ проб показал, что нормативные

значения установлены лишь в трех пробах из 65, что свидетельствует о повсеместном загрязнении территории.

Наибольшие превышения предельно допустимой концентрации по ПО зафиксированы в Чулымском районе (рисунок). Максимальные значения достигают 32 мг О/дм³, что в шесть раз превышает установленную норму (населенные пункты: пос. Чулым и с. Золотая Грива). Второй по загрязненности район – Ордынский, здесь максимальное значение доходит до 14 мг О/дм³ в двух населенных пунктах – в пос. Пролетарский и с. Филиппово, в остальных пробах значения ПО не превышают 5 мг О/дм³, что соответствует установленным нормам.

Природа установленных гидрогеохимических аномалий (по $C_{орг}$ и ПО) требует дополнительных исследований состава органических веществ. Актуальность этих работ многократно возрастает в связи с ужесточением в последние годы требований к оценке безопасности питьевых вод, что связано с их прогрессирующим загрязнением, в том числе высокотоксичными органическими компонентами.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 25-17-20024 и правительства Новосибирской области, проект № 30-2025-000896.

Список литературы

1. Альтовский М.Е. Гидрогеологические показатели нефтегазоносности. М.: Недра, 1967. 121 с.
2. Антипин М.А., Безденежных Н.А., Чугунова Н.А. Актуальные проблемы аналитической гидрогеохимии на современном этапе // Разведка и охрана недр. 2009. № 9. С. 64–68.
3. Бернатонис П.В., Копылова Ю.Г., Бернатонис В.К. и др. Органические вещества в водах сапропелевых озер Томской области // Вестн. ТГУ. 2011. № 348. С. 161–164.
4. Вернадский В.И. История природных вод: Избр. соч. Т. 4, кн. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 651 с.
5. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швеи В.М. Геохимия подземных вод: Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. 677 с.
6. Лепокурова О.Е., Трифонов Н.С., Домрочева Е.В. Миграционные формы основных ионов в подземных водах угленосных отложений Кузбасса с акцентом на соединения с гумусовыми кислотами (по результатам моделирования) // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 3. С. 76–89.
7. Потурай В.А., Компаниченко В.Н., Редин А.А. Органическое вещество в термальных водах Белокурихи // Геология и геофизика. 2025. Т. 66, № 9. С. 1177–1194.
8. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 28.01.2021.
9. Украинцев А.В., Плюснин А.М., Чернявский М.К. Формирование газового, элементного состава и растворенных органических веществ в железистых минеральных водах Западного Забайкалья // Геохимия, 2024. Т. 69, № 6. С. 562–576.
10. Швеи В.М. Органические вещества подземных вод. М.: Недра, 1973. 191 с.
11. Bladder cancer and water disinfection by-product exposures through multiple routes: a population-based case-control study (New England, USA) / F.L.E. Beane, K.P. Cantor, D. Baris, et al. // Environ. Health Perspect. 2017. Vol. 125. N. 6. 067010.
12. Novikov D.A., Dultsev F.F., Maksimova A.A., Derkachyov A.S., Chernykh A.V. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of the Kamenskoye hydro-radon occurrence, Novosibirsk, Russia // Geochemistry. 2023. Vol. 83. N. 4. 126016.
13. Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Pyryaev A.N., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Sukhorukova A.F., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Khvashchevskaya A.A., Kalinkin P.N., Petrozhitsky A.V. Radon-rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia // Groundwater for Sustainable Development. 2023. Vol. 20. 100886.
14. Novikov D.A., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F., Maksimova A.A., Chernykh A.V., Derkachyov A.S. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia // Groundwater for Sustainable Development. 2021. Vol. 15. 8 p.
15. Novikov D.A., Dultsev F.F., Kamenova-Totzeva R., Korneeva T.V. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaeltsovsky–Mochishche zone of Novosibirsk, Russia // Environmental Earth Sciences. 2021. Vol. 80, N. 216.
16. Ramanathan T., Sathasivan A. Dissolved organic carbon concentration changes in surface drinking water sources, treatment challenges and potential solutions // Journal of Water Process Engineering. 2025. Vol. 76. 108188.
17. Richardson S.D. Encyclopedia of Environmental Health / Ed. by J.O. Nriagu. Burlington: Elsevier. 2011. P. 110–136.

УРАН И ТОРИЙ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Новиков Д.А.^{1,2}, Хвашевская А.А.³, Бежин Н.А.²

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск

²Севастопольский государственный университет, Севастополь

³Проблемная научно-исследовательская лаборатория гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Томск, NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Приводятся актуальные данные по распределению урана и тория в разных типах природных вод Крымского полуострова. На территории исследования распространены семь основных групп природных вод: конденсационные (пещеры), речные и озерные (преимущественно пресные), соленых озер, морские с разной степенью разбавления континентальным стоком, грунтовые, артезианские преимущественно пресные и артезианские минеральные. Диапазон величины их общей минерализации варьируется в очень широких пределах – от ультрапресных (40.5 мг/дм³) до сверхкрепких рассолов (330.519 мг/дм³). Концентрации урана (²³⁸U) составляют от 3.10·10⁻⁷ до 0.12 мг/дм³, тория (²³²Th) от 1.92·10⁻⁷ до 1.20·10⁻³ мг/дм³. ²³²Th/²³⁸U отношение составляет 5.26·10⁻⁵ – 9.51. Природа радиоактивности большинства изученных вод связана с ураном. В наибольшей степени обогащены ураном воды соленых озер и нескольких родников, в которых его содержание составляет 0.015 – 0.120, при среднем значении 0.032 мг/дм³.

Ключевые слова: природные воды, гидрогеохимия, уран, торий, Крымский полуостров

Abstract: Current data on the distribution of uranium and thorium in different types of natural waters of the Crimean Peninsula are presented. Seven main groups of natural waters occur in the study area: condensation waters (caves), river and lake waters (predominantly fresh), saline lake waters, marine waters with varying degrees of dilution by continental runoff, groundwater, artesian waters (predominantly fresh), and artesian mineral waters. Their total salinity spans a very wide range—from ultrafresh waters (40.5 mg/L) to highly concentrated brines (330.519 mg/L). Uranium–238 concentrations range from 3.10·10⁻⁷ to 0.12 mg/L, and thorium–232 concentrations range from 1.92·10⁻⁷ to 1.20·10⁻³ mg/L. The ²³²Th/²³⁸U ratio varies from 5.26·10⁻⁵ to 9.51. The radioactivity of most studied waters is primarily attributable to uranium. The highest uranium enrichment is observed in saline lake waters and several springs, where concentrations range from 0.015 to 0.120 mg/L, with an average value of 0.032 mg/L.

Keywords: natural waters, hydrogeochemistry, uranium, thorium, Crimean peninsula

Содержание радионуклидов в гидросфере Земли варьируется в широких пределах. В соответствии с действующими нормативными документами СанПиН 2.1.4.1074–01 с изменениями на 2.04.2018, ГОСТ Р 51232–98, ГН 2.1.5.1315–0 с дополнениями [1–3] предельно допустимая концентрация (ПДК) в питьевых водах по урану (²³⁸U) составляет 0.015 мг/дм³, а по торью (²³²Th) не регламентирована. Согласно оценке научного комитета ООН по воздействию атомной радиации (UNSCEAR), естественные источники вносят более 98 % дозы облучения населения. Естественная радиоактивность природных вод вызывает в мире большой интерес к радиологическому качеству питьевой воды. Крым обладает большим туристическо-рекреационным потенциалом. Одним из важнейших ресурсов для его успешного развития являются природные воды, используемые в питьевых целях, санаторно-курортном лечении и оздоровлении, сельском хозяйстве.

Гидрогеологические исследования Крымского полуострова ведутся более века и связаны с именами С.В. Альбова, Н.А. Белокопытовой, И.Г. Глухова, В.Н. Дублянского, Н.М. Заезжева, Н.Н. Капинос, В.А. Куришко, Е.В. Львова, А.В. Лущика, А.С. Моисеева, В.И. Морозова, Н.С. Огняника, Е.А. Ришес, В.И. Самулева, А.Б. Ситникова, А.А. Сухореброва, В.Г. Ткачук, О.Е. Фесюнова, М.В. Чуринова, В.М. Шестопалова, М.А. Шинкаревского, Ю.И. Шутова, Е.А. Яковлева и других. Наиболее крупное обобщение было выполнено в VIII томе «Гидрогеологии СССР». Крым под редакцией академика А.В. Сидоренко [4]. Из последних исследований следует отметить работы Д.Н. Горобцова, Е.П. Каюковой, А.В. Лущика, Д.А. Новикова, В.Н. Самарцева, С.В. Токарева, А.А. Маслова и других [5–17]. При этом радионуклидному составу природных вод в этих исследованиях практически не уделялось внимания. В этой связи целью настоящей работы является обобщение собственных данных по распределению урана и тория в разных типах природных вод Крымского полуострова. Ранее такой анализ проводился нами на примере разных

геохимических типов природных вод Байдарской долины, расположенной на юго-западе исследуемой территории [18].

Материалы, послужившие основой для настоящего исследования, были получены в период экспедиционных и аналитических исследований 2018–2025 гг. В 2026 г. исследования будут продолжены. За этот период было отобрано и проанализировано 738 проб природных вод. Лабораторное изучение ионно-солевого и микрокомпонентного состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и др. проводилось в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Изученные воды отличаются огромным разнообразием по химическому составу и величине общей минерализации (рисунок, а), их можно разделить на две большие группы: поверхностные и подземные. Поверхностные воды представлены: 1) речными и озерными (преимущественно пресными), 2) озерными (от соленых до рассолов) и 3) морскими водами. В группе подземных вод были изучены: 1) конденсационные (пещеры), 2) грунтовые, 3) артезианские преимущественно пресные и 4) артезианские минеральные. Кратко рассмотрим их общую характеристику.

Поверхностные воды, объединенные в класс *речных и озерных (преимущественно пресных)* (123 пробы) характеризуются рН от 7.5 до 8.8 (среднее 8.0), преимущественно окислительной средой с $E_h = -48.0 \dots +293.5$ мВ (среднее +176.6) и средним содержанием $O_{2 \text{ раств.}}$ 8.0 мг/дм³. Величина общей минерализации изменяется в широком диапазоне – от 160 до 20.0 г/дм³ (среднее 1225 мг/дм³), среднее содержание кремния 3.3 мг/дм³. Состав также весьма разнообразен при доминировании гидрокарбонатного кальциевого типа. Содержание ^{238}U составляет $5.06 \cdot 10^{-5} - 0.04$ мг/дм³ (среднее $1.27 \cdot 10^{-3}$), $^{232}\text{Th} = 1.92 \cdot 10^{-7} - 1.20 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³ (среднее $3.45 \cdot 10^{-5}$), Th/U отношение варьируется в интервале $2.04 \cdot 10^{-4} - 2.26$ (среднее $6.21 \cdot 10^{-2}$).

Класс *озерных вод (от соленых до рассолов)* (37 проб) объединяет воды со средним значением рН равным 8.0 (7.0–10.0), E_h , равным 33 мВ (–385...+220 мВ) и средним содержанием $O_{2 \text{ раств.}}$ 4.8 мг/дм³. Минерализация вод этого класса находится в диапазоне от 8.2 до 330.5 г/дм³ (среднее значение 148.2 г/дм³). Состав вод разнообразен, доминируют воды гидрокарбонатного кальциевого состава (68 %), хлоридного типа со смешанным катионным составом (27 %) и сульфатно-хлоридного типа со смешанным катионным составом (5 %). Содержание ^{232}Th изменяется в диапазоне от $1.85 \cdot 10^{-5}$ до $1.03 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³ (среднее значение $3.51 \cdot 10^{-4}$ мг/дм³), содержание ^{238}U составляет $4.7 \cdot 10^{-4} - 8.21 \cdot 10^{-2}$ мг/дм³ (среднее $1.55 \cdot 10^{-2}$ мг/дм³), интервал Th/U отношения варьируется от $1.58 \cdot 10^{-3}$ до 0.52 (среднее 0.11).

Пробы, относящиеся к классу *морских вод* (140 проб) характеризуются средним показателем $E_h = +101$ мВ, рН = 9, $O_{2 \text{ раств.}} = 7$ мг/дм³. По химическому типу воды хлоридные натриевые со средним значением минерализации 17.9 г/дм³ (8.5 – 21.1 г/дм³). Следует учесть, что огромное влияние на серию морских проб оказали процессы разбавления водами с материка. Пробы этого класса отбирались на разном удалении от береговой линии и с разной глубины, которая варьировалась от поверхности до 120 м. Концентрация ^{232}Th и ^{238}U лежит в диапазонах $6.73 \cdot 10^{-6} - 2.41 \cdot 10^{-4}$ и $3.03 \cdot 10^{-4} - 2.69 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³ соответственно. Th/U отношение находится в диапазоне $5.68 \cdot 10^{-3} - 0.14$ (среднее $3.54 \cdot 10^{-2}$).

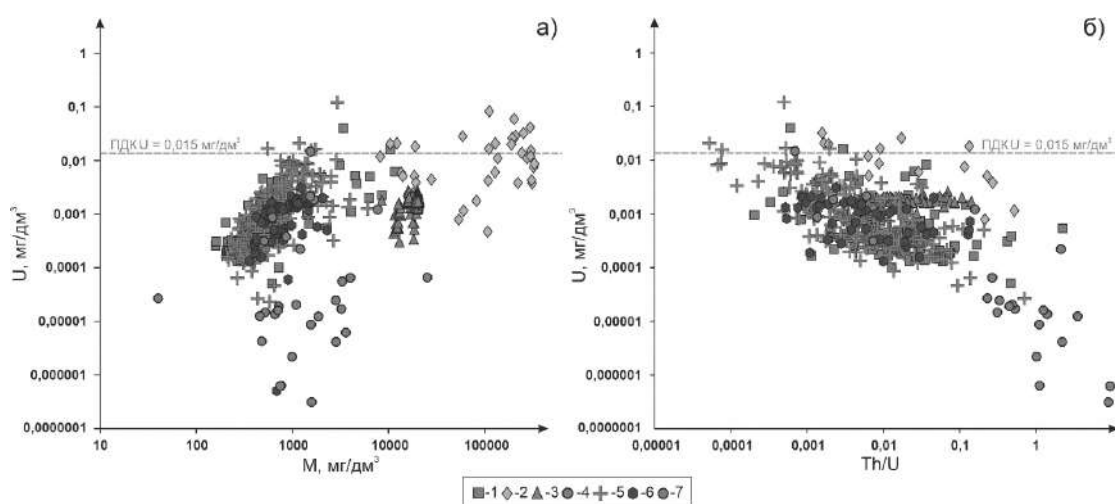
К подземным водам *класса конденсационных вод* относится одна проба, отобранная в пещере Большой Бузлук. $E_h = +122.6$ мВ, рН=8.56, содержание $O_{2 \text{ раств.}}$ 5.0 мг/дм³. По химическому типу проба соответствует гидрокарбонатному кальциевому составу с величиной общей минерализации 40.5 мг/дм³, содержание ^{232}Th и ^{238}U составляет $6.19 \cdot 10^{-6}$ и $2.66 \cdot 10^{-5}$ мг/дм³, а их отношение – 0.23.

Класс *грунтовых вод* объединяет 336 проб, характеризующихся значениями E_h от –62 до +307 мВ, значениями рН от 6 до 9, при средних величинах +189 мВ и 8 соответственно. Среднее содержание $O_{2 \text{ раств.}}$ оценивается в 7 мг/дм³. По составу воды относятся преимущественно к гидрокарбонатному кальциевому типу (64 %). Величина общей

минерализации грунтовых вод изменяется от 214 мг/дм³ до 6.1 г/дм³ (среднее значение 707 мг/дм³). Вариация содержаний ²³²Th составляют 4.01·10⁻⁷ – 1.04·10⁻⁴ мг/дм³, а ²³⁸U 2.30·10⁻⁵ – 0.12 мг/дм³, Th/U отношение изменяется от 5.26·10⁻⁵ до 0.71 (среднее 1.57·10⁻²).

Для класса пресных артезианских вод (75 проб) характерны значения Eh от –178 до +297 мВ, рН от 7 до 9, среднее содержание O₂ раств. 5.2 мг/дм³. В этом классе наибольшим распространением пользуются гидрокарбонатные кальциевые (24 %), хлоридно-гидрокарбонатные кальциево-натриевые (11 %) и хлоридно-сульфатные кальциево-натриевые (11%) воды. Среднее значение минерализации составляет 904 мг/дм³ (диапазон вариации 359 – 2306 мг/дм³). Содержание ²³²Th и ²³⁸U изменяется в интервалах 2.04·10⁻⁷–9.95·10⁻⁵ и 5.04·10⁻⁷–3.06·10⁻³ мг/дм³ соответственно, среднее значение их отношения равно 1.75·10⁻² (интервал 5.20·10⁻⁴–0.14).

Воды, объединенные в класс артезианских (минеральных) (34 пробы), характеризуются рН от 7 до 10 (среднее 8.0), с Eh = –351.0 ... +149 мВ (среднее +176.6) и средним содержанием O₂ раств. 3.0 мг/дм³. Величина общей минерализации изменяется в широком диапазоне – от 426 мг/дм³ до 25.4 г/дм³ (среднее 2638 мг/дм³). Химический состав вод разнообразен при доминировании гидрокарбонатного типа со смешанным катионным составом (50 %). Содержание ²³⁸U составляют 3.10·10⁻⁷–1.46·10⁻² мг/дм³ (среднее 7.8·10⁻⁴), ²³²Th = 7.06·10⁻⁷–4.69·10⁻⁴ мг/дм³ (среднее 3.56·10⁻⁵), Th/U отношение варьируется в интервале 7.00·10⁻⁴–9.51 (среднее 1.59).



Зависимость содержания урана в природных водах Крымского полуострова от величины их общей минерализации (а) и Th/U отношения (б).

Поверхностные воды: 1 – речные и озерные (преимущественно пресные), 2 – озерные (от соленых до рассолов), 3 – морские; подземные воды: 4 – конденсационные (пещеры), 5 – грунтовые, 6 – артезианские (преимущественно пресные), 7 – артезианские (минеральные).

Резюмируя вышесказанное, следует отметить, что концентрации радионуклидов в природных водах Крымского полуострова изменяются от четырех до девяти математических порядков: урана от 3.10·10⁻⁷ до 0.12 мг/дм³ и тория (²³²Th) от 1.92·10⁻⁷ до 1.20·10⁻³ мг/дм³. ²³²Th/²³⁸U отношение варьируется в интервале 5.26·10⁻⁵ – 9.51. Несмотря на большой объем выполненных экспедиционных и аналитических работ, следует констатировать, что в изучении распределения радиоактивных элементов в разных типах природных вод Крымского полуострова мы находимся только в начале пути. Природа радиоактивности изученных объектов в основном связана с ураном, а не с торием, поскольку воды характеризуются окислительными параметрами геохимической обстановки. Их изменение на восстановительные выводит торий на первый план за счет приобретения им миграционной способности, что требует дополнительных исследований.

Список литературы

1. Гидрогеология СССР. Т. VIII. Крым / Гл. редактор А. В. Сидоренко. М.: Недра, 1970. 364 с.
2. ГН 2.1.5.1315–03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. М., 2003. 94 с.
3. Горобцов Д.Н., Никулина М.Е., Пендин В.В., Фоменко И.К., Козловский С.С., Черепанский М.М., Чесалов Л.Е. Оценка современного состояния месторождений подземных вод нераспределенного фонда недр Республики Крым // Геология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2017. № 6. С. 8–16.
4. ГОСТ Р 51232–98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2010. 18 с.
5. Каюкова Е.П., Юровский Ю.Г. Водные ресурсы Крыма // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2016. № 1. С. 25–32.
6. Лущик А.В., Горбатюк Н.В., Морозов В.И. Водоотбор и его влияние на подземные воды пригодные для хозяйственно-питьевого водоснабжения в Крыму // Строительство и техногенная безопасность. 2016. № 12 (54). С. 83–91.
7. Максимова А.А., Новиков Д.А., Хвощевская А.А., Коростелев М.Ю. Геохимия природных вод урочища Кастрополь (Южный берег Крымского полуострова) // Устойчивое развитие горных территорий. 2022. Т. 14, № 3. С. 391–400.
8. Маслов А.А., Самарцев В.Н., Гриневский С.О., Преображенская А.Е., Лехов В.А., Филимонова Е.А., Барановская Е.И., Глухова С.А., Харитоновна Н.А., Поздняков С.П. Оценка ресурсного потенциала подземных вод Крыма на основе региональной геофильтрационной модели полуострова // Разведка и охрана недр. 2025. № 2. С. 27–35.
9. Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Пыряев А.Н., Хвощевская А.А., Ничкова Л.А., Сигора Г.А., Яхин Т.А. Новые изотопно-гидрогеохимические данные по составу природных вод Байдарской долины (Крымский полуостров) // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 12. С. 1705–1726.
10. Новиков Д.А., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. Новый взгляд на гидрогеологические условия города федерального значения Севастополь // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 8. С. 105–122.
11. Новиков Д.А., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. Оценка качества подземных вод верхнеюрских отложений юго-западных районов Крымского полуострова для целей питьевого и сельскохозяйственного водоснабжения // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23, № 4. С. 52–57.
12. Новиков Д.А., Корнеева Т.В., Копылова Ю.Г., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Хвощевская А.А. Первые данные о распределении урана и тория в природных водах Байдарской долины (Крымский полуостров) // Химия в интересах устойчивого развития. 2021. Т. 29, № 4. С. 461–471.
13. Новиков Д.А., Черных А.В., Хвощевская А.А., Максимова А.А., Деркачев А.С., Дульцев Ф.Ф., Ничкова Л.А., Сигора Г.А., Хоменко Т.Ю., Яхин Т.А. Токсичные элементы в природных водах Севастопольской городской агломерации: распределение, фон, аномалии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 4. С. 79–92.
14. Самарцев В.Н., Чиганов И.А., Гриневский С.О., Поздняков С.П., Сорокоумова Я.В., Бакшевская В.А. Оценка влияния климатических изменений XXI в. на баланс подземных вод Юго-Западного Крыма // Водные ресурсы. 2024. Т. 51, № 6. С. 806–821.
15. СанПиН 2.1.4.1074–01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения. М., 2018. 125 с.
16. Токарев С.В., Амеличев Г.Н., Амеличев Е.Г. Оценка уязвимости карстовых подземных вод к загрязнению на основных массивах горного Крыма с использованием региональной методики // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16, № 1 (59). С. 397–409.
17. Хвощевская А.А., Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Сметанина И.В., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. Роль системы «вода – порода» в процессах формирования состава природных вод Севастопольской городской агломерации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 1. С. 118–128.
18. Черных А.В., Козловская О.Н., Новиков Д.А., Хвощевская А.А. Особенности геохимии и экологическое состояние современных очагов разгрузки подземных вод юго-западной части Крымского полуострова // Устойчивое развитие горных территорий. 2025. Т. 17, № 2. С. 636–647.

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ОКРУГОВ ГОРНО-САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД

Попов В.Н.

ООО НПФ «Аквастрим», Иркутск, irk.popovvn@yandex.ru

Аннотация. Определение границ округов горно-санитарной охраны месторождений минеральных вод является важнейшим условием при эксплуатации водозабора. При этом обязательно должны учитываться гидрогеологические аспекты, обуславливающие степень защищенности продуктивного горизонта от возможных загрязнений. Показано, что для зоны интенсивного водообмена и зоны затрудненного водообмена подходы к определению границ округов будут существенно различаться.

Ключевые слова: минеральные воды, горно-санитарный округ, водоносный горизонт

Abstract. Determining the boundaries of the mining and sanitary protection districts of mineral water deposits is the most important condition for the operation of the water intake. In this case, it is necessary to take into account the hydrogeological aspects that determine the degree of protection of the productive horizon from possible pollution. It has been shown that for the zone of intensive water exchange and the zone of difficult water exchange approaches to determining the boundaries of districts will differ significantly.

Keywords: mineral waters, mining and sanitary district, water-bearing horizon

Согласно постановлению правительства № 1186 от 30 августа 2024 г. округа горно-санитарной охраны устанавливаются на территории природных лечебных ресурсов, в том числе для месторождений минеральных вод. В границах округа выделяются три зоны. Первая зона предназначена для защиты средств добычи минеральных вод от случайных или умышленных загрязнений и повреждений. Вторая зона оконтуривает территорию, примыкающую к месту добычи (водозабору) минеральных вод, где вследствие хозяйственной деятельности происходит бактериологическое загрязнение, а также незначительное влияние без утраты бальнеологической ценности на свойства вод продуктивного горизонта. Третья зона предназначена для охраны месторождения минеральных вод от химического воздействия и истощения в области питания.

При этом в границах округа горно-санитарной охраны, который устанавливается в целях охраны природных лечебных ресурсов, содержащихся в отдельно расположенных природных объектах, имеющих высокую степень естественной защищенности, устанавливается только одна (первая) зона округа горно-санитарной охраны [3], т.е. места добычи минеральных вод с высокой степенью защиты имеют только одну зону округа, равную 15 м. Вторая и третья зоны в этом случае не устанавливаются, так как условия для загрязнения продуктивного горизонта на территории области питания отсутствуют.

Следует более подробно остановиться на рассмотрении условий, определяющих защищенность подземных вод. В соответствии с представлениями о вертикальной гидродинамической зональности [2] выделяется зона интенсивного (свободного) водообмена и зона замедленного (затрудненного) водообмена. В зоне свободного водообмена подземные воды перемещаются со значительной скоростью, измеряемой в метрах и сантиметрах в секунды, часы, сутки. Время взаимодействия подземных вод со вмещающими породами ограничено и процесс минерализации происходит достаточно быстро. В зоне затрудненного водообмена скорость движения подземных вод измеряется вековыми циклами, фиксируемыми тектонической деятельностью. Формирование состава минеральных вод определяется скоростью растворения минералов водовмещающих пород и зависит от структурного положения водоносного горизонта в массиве пород. Газовая составляющая образуется при химических реакциях разложения минералов или привносится с участков активизации тектонических процессов.

Зона интенсивного водообмена дренируется повсеместно, что позволяет отнести находящиеся там водоносные горизонты к незащищенным. Однако на отдельных участках четвертичные образования создают из глинистых пород покров практически водонепроницаемых на достаточно длительный период времени. Это позволяет при должном

гидрогеологическом обосновании отнести такие участки недр к защищенным от загрязнения с поверхности. Минеральные воды зоны затрудненного водообмена имеют естественную защищенность от загрязнения с поверхности. Они перекрыты толщей водонепроницаемых пород, обладают напором, нередко выше отметки земли, и фонтанируют.

При определении размеров зон санитарной охраны подземных источников питьевого водоснабжения в основу положен механизм бактериологического и химического загрязнения движения их из области питания к водозабору. Гипотетически предполагается обязательное попадание загрязняющих веществ в область питания водоносного горизонта. Путем гидрогеологических расчетов определяются размеры зоны, бактериологического и химического загрязнения [4]. Подобный подход к определению размеров границ зон округов горно-санитарной охраны месторождений минеральных вод изложен в методических рекомендациях, разработанных группой специалистов [1]. Следует отметить, что такая методика возможна лишь для подземных водоносных горизонтов, формирующихся в зоне интенсивного водообмена, что для минеральных вод не имеет сплошного развития и, скорее, проявляется как исключение. Минеральные воды обычно приурочены к зоне затрудненного водообмена, где действует особый гидродинамический режим. Бактериологическое загрязнение для этих условий, с учетом напорного характера подземных вод, практически исключено [2]. Химическое загрязнение в области питания может происходить только очень длительный геологический период времени, несопоставимый со временем бытия человека (более века).

Представляется, что в положении об округах санитарной охраны природных лечебных ресурсов совершенно справедливо указано, что для природных объектов, имеющих высокую степень естественной защищенности, устанавливается только одна (первая) зона округа горно-санитарной охраны, равная 15 м [3]. Более того при надлежащем гидрогеологическом обосновании размеры первой зоны можно сократить.

Вместе с тем в положении указывается, что в результате техногенной деятельности могут возникнуть условия, при которых выделение дополнительно зон санитарной охраны необходимо. Это могут быть участки с наличием неликвидированных и ликвидированных скважин, колодцы, родники и др., находящиеся в сфере влияния продуктивного горизонта минеральных вод. Всю эту территорию представляется необходимым включать в пределы границ округа горно-санитарной охраны, так как источник загрязнения потенциально существует. В случае напорных подземных минеральных вод существует опасность истощения, т.е. при фонтанировании или даже восходящем режиме источников (родников) напор, а соответственно, запасы подземных минеральных вод будут неизбежно снижаться.

Образование второй зоны и, следовательно, границ округа горно-санитарной охраны в этом случае оправдано и согласуется с постановлением [3]. Третья зона не выделяется, за исключением случаев, когда в пределах области питания подземных минеральных вод создается угроза химического загрязнения продуктивного горизонта. Однако для хорошо защищенной зоны затрудненного водообмена такие условия возникают крайне редко.

При определении размеров округов горно-санитарной охраны месторождений минеральных вод необходимо учитывать структурное положение продуктивного горизонта в массиве, техногенное воздействие на область питания, естественные выходы минеральных вод на поверхность – родники.

Список литературы

1. Методические рекомендации по расчету размеров границ зон округов горно-санитарной охраны месторождений (участков месторождений) минеральных подземных вод. М., 2025. 17 с.
2. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. Новосибирск: Наука, 1983. 241 с.
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 30 августа 2024 г. №1186 «Об утверждении положения об округах санитарной (горно-санитарной) охраны природных лечебных ресурсов». Рекомендации по гидрологическим расчетам для определения границ 2 и 3 поясов зон санитарной охраны подземных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения. М., 1983. 102 с.

ВЛИЯНИЕ КОЛЛОИДНЫХ ЧАСТИЦ НА ДИНАМИКУ ПЕРЕНОСА РАДИОНУКЛИДОВ В УСЛОВИЯХ ПУНКТОВ ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Розов К.Б.^{1,2}, Румынин В.Г.^{1,2}, Пупина В.А.¹, Вилькина М.В.^{1,2}, Никуленков А.М.^{1,2}, Гембель Л.Р.¹

¹Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Санкт-Петербург, k.rozov@hgepro.ru

²Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Санкт-Петербург

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований по взаимодействию коллоидных частиц с поверхностями трещин в образцах горных пород, отобранных на участке планируемого размещения пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов, а также оценки степени обратимости сорбции радионуклидов на коллоидах, формирующихся при разрушении материалов искусственных барьеров безопасности.

Ключевые слова: коллоиды, сорбция, трещиноватые породы, радиоактивные отходы, миграция

Abstract. The study presents experimental findings that examine the interaction of colloidal particles with fracture surfaces in rock samples collected from the proposed geological disposal site, as well as the reversibility of radionuclide sorption on colloids produced by the degradation of engineered barrier materials.

Keywords: colloids, sorption, fractured rock, radioactive waste, subsurface solute transport

С середины 1980-х годов опубликовано множество работ (например, [3–5]), показывающих, что коллоиды способны переносить загрязняющие компоненты со скоростями, сопоставимыми со скоростью фильтрации подземных вод, повышая риск распространения загрязнения. Несмотря на большой объем данных о сорбционных свойствах минералов – источников коллоидов, возникающих при эрозии искусственных барьеров безопасности (ИББ) на основе бентонитовой глины в пунктах глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) [6, 7], механизмы удержания коллоидных частиц на стенках трещин и закрепления радионуклидов на коллоидах изучены недостаточно. Цель работы – экспериментально оценить закрепление коллоидных частиц на стенках трещин в породах участка планируемого размещения ПГЗРО и проанализировать обратимость сорбции радионуклидов на коллоидах, образующихся при разрушении ИББ.

Получение коллоидных суспензий. Коллоидные суспензии из бентонитов (месторождения «10-й Хутор», «Таганское», «Кантатское») готовили путем ультразвукового диспергирования навески (~3 г/дм³) в деионизированной воде. Крупные частицы удаляли отстаиванием, центрифугированием и фильтрацией через мембрану 0.8 мкм. Концентрацию коллоидов определяли гравиметрически. Метод кислотно-щелочного титрования использовался для расчета констант протонирования и депротонирования.

Опыты по взаимодействию коллоидов с поверхностями трещин в образцах горных пород. Экспериментальные ячейки изготавливались из образцов керна четырех скважин. Перед сборкой образцы промывали водой и сушили при комнатной температуре. Площадь трещин определяли по контурам на миллиметровой бумаге. Ячейки собирали, используя силиконовые трубки, стальную проволоку и хомуты; герметичность обеспечивали нанесением расплавленного парафина. Эксперименты проводили в естественной, подкисленной (рН ≈ 3) и щелочной (рН 10–11) среде. До и после опытов измеряли рН, мутность суспензий, размер частиц и элементный состав.

Опыты по сорбции – десорбции радионуклидов на коллоидные суспензии. Сорбционные эксперименты проводили с коллоидными суспензиями, полученными по методике, представленной в разделе 2.1. В качестве раствора использовали имитат подземных вод участка Енисейского; ионную силу регулировали перхлоратом аммония, рН – растворами аммиака и хлорной кислоты. К суспензии добавляли имитат с радионуклидами

Am-241, Cs-137 и Sr-90 (концентрация $5 \cdot 10^{-8}$ моль/дм³) и перемешивали на вибромешалке при Ж:Т = 400. Коллоиды отделяли центрифугированием, остаточную активность определяли по γ - и β -излучению. Десорбцию Am-241 проводили в имитате природной воды при ионной силе 0.05 и 0.10 и рН = 4, 6, 8, 10.

Взаимодействие коллоидных частиц с поверхностями трещин. Максимальная оптическая плотность зафиксирована в суспензии из кантатского сырья и отражает повышенную концентрацию коллоидов (1.46 ± 0.12 г/дм³). При подкислении (рН ≈ 3) в течение первого часа происходила интенсивная коагуляция и осаждение коллоидов. После контакта подкисленной суспензии с трещинами рН возрастала до 7, что свидетельствует о нейтрализации раствора карбонатными минералами.

Фотоколориметрические измерения не выявили существенных изменений мутности суспензий после контакта с трещинами, что говорит об отсутствии сорбции коллоидов.

Размер частиц после контакта с трещинами зависит от рН среды. В кислой среде размер частиц таганской глины и «10-го Хутора» уменьшается, в кантатской – увеличивается. В щелочной среде размеры кантатской и таганской суспензий стабильны, «10-го Хутора» – снижаются. В нейтральной среде наблюдается увеличение размера коллоидных частиц в суспензии на основе кантатской глины и уменьшение в таганской.

В нейтральной среде химический состав суспензий после контакта с трещинами фактически не менялся, указывая на отсутствие растворения минеральных фаз и сорбции. В кислых растворах фиксируется растворение кальцита, о чем свидетельствует рост концентрации Са.

Сорбция – десорбция радионуклидов на коллоидные частицы. Сорбционные опыты позволили оценить временные зависимости сорбции радионуклидов и рассчитать коэффициенты распределения (K_d). Установлено, что сорбционное равновесие достигается в течение суток. K_d (Am-241) возрастает при повышении рН и уменьшении ионной силы раствора.

Десорбированный Am-241 рассчитывали как разницу между сорбированным количеством и содержанием в водной фазе после десорбции. Для расчетов использовали данные первой ступени десорбции. Опыты показали резкое несовпадение изотерм сорбции и десорбции, свидетельствуя либо о низких скоростях десорбции. При этом десорбция слабо зависит от рН и ионной силы раствора.

Разработка статических и миграционных моделей с учетом коллоидных частиц

Экспериментальные данные использовали для построения моделей сорбции радионуклидов на коллоидные частицы (статические модели) и моделей массопереноса. Опыты по кислотнo-щелочному титрованию позволили рассчитать константы протонирования и депротонирования поверхности коллоидных частиц и определить преобладающие формы поверхностных площадок, влияющих на сорбцию радионуклидов.

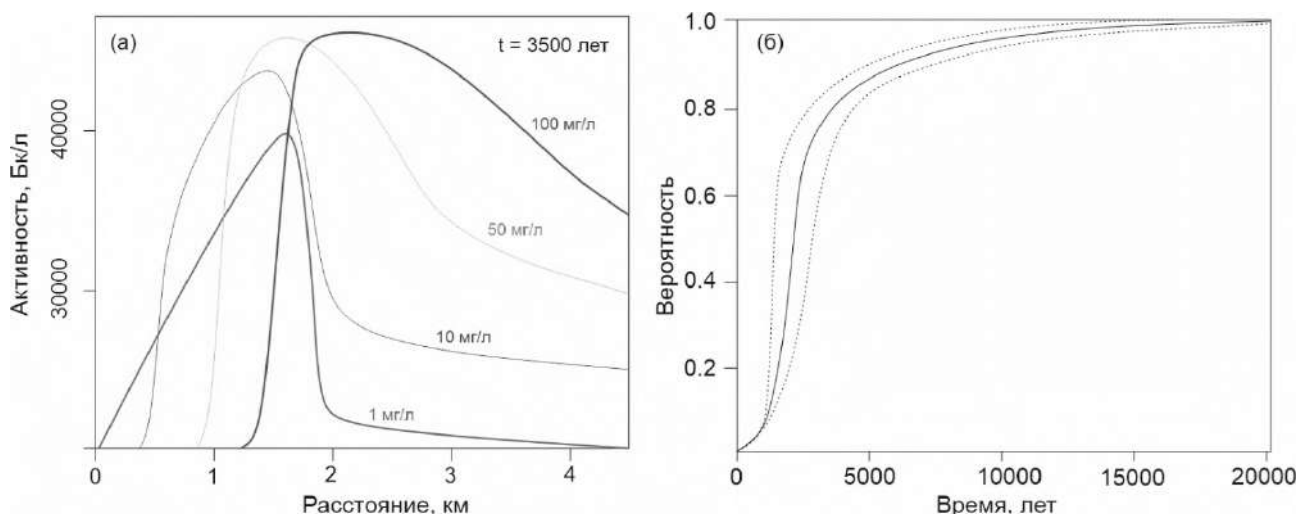
Для моделирования сорбции радионуклидов на коллоиды были проанализированы литературные данные. Установлено, что основной вклад в сорбцию радионуклидов на коллоиды, образующиеся при разрушении ИББ, вносит монтмориллонит, иллит и каолинит. Модели взаимодействий «радионуклид-коллоид» сводятся к двум типам реакций: ионный обмен и поверхностное комплексообразование на нескольких сорбционных площадках: с учетом или без учета электростатических взаимодействий (таблице).

Для миграционных расчетов использовались программы PhreeqC [2] и LEHGC [8], а также аналитические модели, реализованные в программном комплексе АНСДИМАТ [1]. Выполнены прогнозы, показывающие существенное влияние коллоидных частиц на интенсивность и скорость распространения радионуклидного загрязнения подземными водами в различных аварийных сценариях. Результаты представлены в виде концентрационных и вероятностных кривых активности радионуклидов в контрольных точках вдоль потока (рисунок).

Типы основных моделей сорбции радионуклидов на поверхность коллоидных частиц

Радионуклид	Тип реакций	Каолинит	Монтмориλλονит	Иллит
		Тип сорбционных площадок		
Am-243	NCM+CEX	$>\text{SOH}$, $>\text{XH}$, $>\text{XM}$	$>\text{S}^{\text{s}}\text{OH}$, $>\text{S}^{\text{w}1}\text{OH}$, $>\text{S}^{\text{w}2}\text{OH}$, $>\text{XM}$	$>\text{S}^{\text{s}}\text{OH}$, $>\text{S}^{\text{w}1}\text{OH}$, $>\text{S}^{\text{w}2}\text{OH}$, $>\text{XM}$
Cs-137	CEX	$>\text{X}^{\text{s}1}\text{M}$, $>\text{X}^{\text{s}2}\text{M}$	$>\text{X}^{\text{s}1}\text{M}$, $>\text{X}^{\text{s}2}\text{M}$	$>\text{X}^{\text{s}1}\text{M}$, $>\text{X}^{\text{s}2}\text{M}$, $>\text{X}^{\text{s}3}\text{M}$
Sr-90	TLM (+CEX)	$>\text{SOH}$, $>\text{TOH}$	$>\text{SOH}$, $>\text{TOH}$	$>\text{S}^{\text{s}}\text{OH}$, $>\text{S}^{\text{w}1}\text{OH}$, $>\text{S}^{\text{w}2}\text{OH}$, ($>\text{XM}$)

Примечание. CEX – катионообменные модели (“cation-exchange models”); NCM – модели неэлектростатического поверхностного комплексообразования (“non-electrostatic surface complexation models”); TLM – трехслойная модель (электростатическая) (“triple-layer model”).



(а) Концентрационные кривые Am, демонстрирующие эффект влияния концентрации коллоидных частиц в воде (1, 10, 50, 100 мг/дм³) на положение фронта загрязнения спустя 3500 лет после начала миграции; (б) кривая накопленной вероятности нахождения максимума загрязнения Am на расстоянии 4.5 км от источника загрязнения по ходу потока фильтрации (пунктирные кривые – предельные случаи, рассчитанные на основе 288 сценариев).

Экспериментально установлена низкая сорбционная способность поверхностей трещин горных пород в отношении коллоидных частиц. При этом зафиксирована интенсивная и практически необратимая сорбция радионуклидов непосредственно на коллоидах. На основе кислотно-щелочного титрования определены константы гидролиза поверхности коллоидов, использованные в прогнозах. Моделирование показало прямую зависимость масштабов загрязнения от содержания коллоидов. При концентрации коллоидов до 50 мг/дм³ фронт миграции Am-241 остается локализованным, а увеличение содержания до 100 мг/дм³ приводит к значительному ускорению переноса и дисперсии концентрационной кривой (рисунок, а). При переносе радионуклидов в присутствии коллоидных частиц (более 50 мг/дм³) с большой вероятностью (80 %), пиковая концентрация в контрольной точке (расстояние 6.5 км от источника по потоку) установится через ~1900 лет после начала выхода загрязнения (рисунок, б). Таким образом, учет коллоидного массопереноса является значимым фактором при обосновании долгосрочной безопасности объектов ПГЗРО.

Список литературы

1. Гидрогеологические расчеты с использованием программы ANSDIMAT / Л.Н.Синдаловский – СПб: Наука, 2021. 891 с.
2. Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3 - A Computer Program for Speciation , Batch-Reaction , One-Dimensional Transport , and Inverse Geochemical Calculations. Reston, VA: Survey U. S. G., 2013. 497 с. 0092-332X.

3. Iijima K., Shoji Y., Tomura T. Sorption behavior of americium onto bentonite colloid // *Radiochim. Acta*. 2008. T. 96. C. 721–730.
4. Kunze P., Seher H., Hauser W., Panak P. J., Geckeis H., Fanghänel T., Schäfer T. The influence of colloid formation in a granite groundwater bentonite porewater mixing zone on radionuclide speciation // *Journal of Contaminant Hydrology*. 2008. T. 102, № 3. C. 263–272.
5. Missana T., Alonso U., Turrero M. J. Generation and stability of bentonite colloids at the bentonite/granite interface of a deep geological radioactive waste repository // *Journal of Contaminant Hydrology*. 2003. T. 61. C. 17–31.
6. Nuttall H.E., Long R.L. Mobility of radioactive colloidal particles in groundwater // *Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle*. 1993. T. 17, № 3-4. C. 237–251.
7. Vilks P., Degueudre C. Sorption behaviour of ^{85}Sr , ^{131}I and ^{137}Cs on colloids and suspended particles from the Grimsel Test Site, Switzerland // *Applied Geochemistry*. 1991. T. 6, № 5. C. 553–563.
8. Users' manual for LEHGC: A Lagrangian-Eulerian Finite-Element Model of Hydrogeochemical Transport Through Saturated-Unsaturated Media Version 11. United States, 1995. 232 c.

ПРОБЛЕМЫ ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРАВОБЕРЕЖЬЯ р. ОБИ (ВОСТОЧНАЯ ЧАСТЬ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ)

Сухорукова А.Ф., Яндола Н.И., Черных В.В.

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Новосибирск, SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru*

Аннотация. Город Новосибирск и Новосибирская область имеют два источника централизованного питьевого водоснабжения: реку Обь и подземные воды. Водоснабжение правобережной части Новосибирской области осуществляется за счет подземных вод зоны трещиноватости палеозойских пород. Воды по составу гидрокарбонатные кальциево-магниевые, пресные, с содержанием железа и марганца, превышающим ПДК, часто очень существенно, жесткие, 5–9 мг*экв/ л, с низкой фтороносностью, что определяется природными факторами. Основными загрязняющими компонентами подземных вод являются мышьяк, нефтепродукты, бор, нитрит, аммоний, нитраты, литий, селен, а также несоответствие по окисляемости перманганатной, содержанию органического углерода, общей альфа-активности и концентрации радона.

Ключевые слова: *питьевое водоснабжение населения, загрязняющие вещества, качество подземных вод, Новосибирская область*

Abstract. The city of Novosibirsk and the Novosibirsk Region have two sources of centralized drinking water supply: the Ob River and groundwater. The water supply of the right-bank part of Novosibirsk is carried out at the expense of groundwater from the fractured zone of Paleozoic rocks. The waters are calcium–magnesium bicarbonate, fresh, with an iron and manganese content exceeding the maximum permissible concentration, often very significantly, water hardness 4–9 mg * eq/ l, with low fluorine content, which is determined by natural factors. The main polluting components of groundwater are arsenic, petroleum products, boron, nitrite, ammonium, nitrates, lithium, selenium, as well as inconsistencies in permanganate oxidability, organic carbon content, total alpha activity, and radon concentration.

Keywords: *drinking water supply to the population, pollutants, groundwater quality, Novosibirsk region*

Одной из самых актуальных задач в настоящее время является проблема обеспечения населения Новосибирской области питьевой водой в достаточном количестве и нормативного качества. В Новосибирской области для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения используются поверхностные и подземные воды. Правительством Новосибирской области было принято Постановление «Об утверждении Региональной программы по повышению качества водоснабжения на территории Новосибирской области на период с 2019 по 2026 год» [4], направленное на решение этой важнейшей социальной задачи, в рамках этой программы проводится комплекс мероприятий по реструктуризации имеющихся водозаборов, улучшению качества питьевых вод, подаваемых потребителю.

Поверхностными водоисточниками для города Новосибирска и городов области являются Новосибирское водохранилище, реки Обь, Бердь, Иня. В Новосибирском водохранилище наблюдается многолетнее превышение предельно допустимых концентраций алюминия и железа [6]. Новосибирское водохранилище характеризуется обильным развитием фитопланктона по сравнению с другими водохранилищами Сибири. В реке Оби определяется высокое содержание ионов железа, в летне-осенний сезон фиксируется загрязнение воды кишечной микрофлорой. Р. Бердь является источником питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения двух наиболее крупных после Новосибирска городов Бердск и Искитим, а также рабочего поселка Маслянино Маслянинского района Новосибирской области. Это второй по значимости после р. Оби и водохранилища поверхностный источник централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения в области. В весенний и осенний сезон биохимическое потребление кислорода воды в створе Бердского водозабора превышает гигиенический норматив почти в половине проб. Одновременно регистрируется увеличение концентрации аммиака в воде. Зарегистрированы высокие концентрации в воде р. Бердь железа и марганца. Р. Иня загрязняется сточными водами уже в ее верховье на территории Кемеровской области и неблагоприятна для водопользования населения.

Город Новосибирск имеет два источника централизованного питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения: р. Обь и подземные воды в районе Академгородка. На р. Оби сооружено четыре водозабора, система водоподготовки на НФС имеет две ступени очистки воды с набором сооружений: смесители перегородчатого типа, камеры хлопьеобразования, горизонтальные отстойники, резервуары чистой воды, обеззараживание воды осуществляется активным хлором и ультрафиолетовым облучением [5]. Хлорирование воды, помимо несомненной пользы, может приводить к образованию хлорорганических соединений, которые являются мощными канцерогенами, на что указывали еще в 90-е годы прошлого столетия сотрудники ОИНГГ СО АН [1].

Население г. Новосибирска и других городов Новосибирской области на 93 % обеспечивается поверхностными водами. В сельских поселениях области питьевое и хозяйственно-бытовое водоснабжение населения осуществляется подземными водами, в настоящее время эксплуатируются более 1200 систем централизованного водоснабжения (около 3000 скважин), что обеспечивает 87 % населения. Далеко не всегда на водозаборах в области проводится водоподготовка перед подачей воды населению, качественной водой обеспечивается менее 50 % сельского населения [4]. Количество индивидуальных скважин, с дебитом до 100 м³/сут, которые не получают лицензии, существенно больше и продолжает увеличиваться в связи с активным строительством дачных и коттеджных поселков, развитием промышленных площадок, разработкой карьеров.

В настоящей работе рассматриваются вопросы водоснабжения населения правобережной восточной части Новосибирской области. Восточная часть Новосибирской области имеет существенно большую плотность населения на квадратный метр (исключая территорию города Новосибирска), 20.5 чел/м², по сравнению с западной частью, где плотность населения составляет 5.2 чел/м². В пределах восточной части находится Новосибирский район (окружает город и имеет площадь почти в пять раз больше, чем сам город Новосибирск), Искитимский, Черепановский, Сузунский, Маслянинский, Тогучинский и Болотнинский районы. Необходимо отметить, что на региональный гидрогеохимический фон, отличающийся на большей территории области природным неблагоприятием качества подземных вод (жесткость, содержание железа и марганца превышают ПДК), дополнительно накладывается техногенное загрязнение. Наибольшее воздействие на загрязнение подземных вод оказывается в пределах промышленных и селитебных территорий. В основном водозаборы и участки с загрязненными подземными водами примыкают к Новосибирскому промышленному району, охватывающему г. Новосибирск и прилегающие площади Новосибирского, Искитимского, Черепановского, Коченевского районов.

В гидрогеологическом отношении в пределах Новосибирской области выделяются две резко различные структуры I порядка – Западно-Сибирский сложный артезианский бассейн пластовых вод и Алтае-Саянская сложная гидрогеологическая складчатая область. Центральная и западная часть территории области расположены в пределах Западно-Сибирского бассейна, а восточная – в пределах Алтае-Саянской области. Граница между этими структурами принята по линии выклинивания кайнозойских отложений платформенного чехла, залегающих непосредственно на образованиях палеозоя горного обрамления плиты, т.е. по линии сочленения Западно-Сибирской плиты и Алтае-Саянской складчатой области, скрытой под отложениями чехла мощностью до 200 м. Схематично эту границу можно провести по долине р. Оби [2].

Основные эксплуатируемые горизонты подземных вод правобережья Оби Новосибирской области — это водоносная зона трещиноватости палеозойских пород, в отличие от левобережной части области, где основными источниками подземных вод, пригодными для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, являются водоносный комплекс четвертичных аллювиальных отложений долины р. Оби, водоносные горизонты плейстоценовых, неогеновых, палеогеновых, меловых отложений. Подземные воды приурочены к региональной трещиноватости и зонам тектонических нарушений палеозойских пород, представленных девонскими и каменноугольными аргиллитами,

песчаниками, глинистыми сланцами, известняками, реже НФС порфиритами, конгломератами. Кровля трещиноватых пород вскрывается на глубине до 30–60 м, реже до 100–180 м. Мощность зоны интенсивной трещиноватости 40–50 м. Уровень подземных вод устанавливается от 11.3 м выше до 60 м ниже поверхности земли. Обводненность зоны трещиноватости неравномерная и находится в зависимости от состава пород, степени и характера трещиноватости и в целом характеризуется малой водообильностью.

В геологическом строении территории города Новосибирска и Новосибирского района принимают участие гранитные интрузии, которые в пермско-триасовое время внедрились в верхнедевонско-нижнекаменноугольные породы и образовали Новосибирский гранитоидный массив [2]. Водоносный горизонт палеозойских интрузивных образований не используется в качестве централизованного источника водоснабжения, так как эти воды характеризуются высокими значениями альфа-активности и концентрации радона. Радоновые воды потенциально возможно использовать в бальнеологических целях. Сотрудниками лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири зафиксирована концентрация радона в водах Новосибирского гранитоидного массива 1161 Бк/дм³, по фондовым данным более – 25000 Бк/л что превышает концентрации радона в водах Белокуринского месторождения – известного российского курорта. При этом необходимо отметить, что воды с содержанием радона, превышающим ПДК, достаточно часто используются для водоснабжения садовых обществ, коттеджных поселков и частных домовладений [3, 4, 7, 9], что оказывает неблагоприятное воздействие на здоровье людей.

Для территории г. Новосибирска и Новосибирской области с 2018 г., коллективом лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СО РАН проводятся работы по изучению геохимического и радионуклидного состава, выявлению токсичных элементов (824 пробы), составу водовмещающих пород (173 образца), оценке качества подземных вод для питьевого водоснабжения [3, 4, 7–9]. На основе фондовых материалов ТФГИ по Сибирскому федеральному округу, ООО Новосибиргеомониторинг и ФГУП «Управление энергетики и водоснабжения» г. Новосибирска были проведен анализ химического состава подземных вод водозабора Новосибирского научного центра за многолетний период эксплуатации [8].

К настоящему времени сотрудниками лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СО РАН отобрано и проанализировано 630 проб подземных вод правобережья Новосибирской области, непосредственно на объектах было выполнено определение быстроизменяющихся компонентов pH, Eh, температуры, содержания растворенного O₂, HCO₃³⁻ и радона. Последующее лабораторное изучение полного химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП) проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ (г. Томск).

Анализ результатов многолетних наблюдений и полученных новых данных свидетельствует о том, что подземные воды палеозойских пород относятся преимущественно к гидрокарбонатным кальциево-магниевым, пресным, с содержанием железа и марганца, практически всегда превышающим ПДК, часто существенно, с жесткостью 5–9 мг–экв/л, низкой фтороносностью, в отдельных случаях с концентрацией, радона незначительно превышающей ПДК. Выше перечисленные показатели определяют гидрогеохимический фон вод, их существенных колебаний, как годовых, так и многолетних, не отмечается. Необходимо отметить, что практически все отобранные пробы воды имеют превышения минимум одного, чаще двух и более показателей по ПДК для питьевых вод. Загрязнение ограничивается локальными участками, концентрация нитратов, нитритов и аммония по большей части непостоянна во времени. Концентрация мышьяка (первый класс опасности), превышающая ПДК, отмечается на постоянной основе в водах водозабора Береговой–1 г. Новосибирска, водозабора г. Черепаново (Безменовское месторождение), пос. Дорогино, Евсино, АО «Разрез Колыванский», в частных скважинах Новосибирского района. Превышение ПДК по содержанию мышьяка составляет 17 % от количества

проанализированных проб [10]. Такое постоянство в повышенном содержании мышьяка в водах свидетельствует о природном характере, необходимы дополнительные исследования водовмещающих пород для определения путей миграции мышьяка, хотя однократные или периодические повышения могут свидетельствовать о техногенном загрязнении.

На крупных водозаборах подземные воды перед подачей потребителям проходят водоподготовку, с помощью которой из воды удаляются железо и марганец, соответственно уменьшается и мутность. Подземные воды, подаваемые жителям мелких населенных пунктов, чаще всего вообще не проходят никакой водоподготовки, и потребителям поступают в естественном своем состоянии. В связи с этим следует проводить разъяснительную работу с населением о необходимости проведения полного анализа химического состава вод индивидуальных скважин с широким спектром элементов от лития до урана, а также применения различных методов водоподготовки в случае обнаружения загрязняющих веществ.

Исследования проводились при финансовой поддержке проекта РНФ, проект № 25–17–20024.

Список литературы

1. Аношин Г.Н., Воротников Б.А. Оценка загрязненности питьевых вод и природных вод Академгородка тяжелыми металлами // Окружающая среда и экологическая обстановка в Новосибирском научном центре СО РАН. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1995. С. 89–109.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N–44. Новосибирск. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. 392 с.
3. Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Сухорукова А.Ф. и др. Об открытии слаборадоновых вод – Инские источники // Геология и геофизика. 2022. Т. 63, № 12. С. 1714–1733.
4. Новиков Д.А., Пыряев А.Н., Максимова А.А., Сухорукова А.Ф., Дульцев Ф.Ф., Деркачев А.С., Черных А.В., Хвощевская А.А. Об открытии слаборадоновых вод – Седова заимка // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 12. С. 61–73.
5. Правительство Новосибирской области. Постановление от 29 июля 2019 г. N 287–п «Об утверждении Региональной программы по повышению качества водоснабжения на территории Новосибирской области на период с 2019 по 2026 г.» (с изменениями на 11 апреля 2024 г.) <https://docs.cntd.ru/document/465765199?marker>.
6. СанПиН 2.1.3684–21 Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий (с изменениями на 14 февраля 2022 г.). М., 2022. 65 с.
7. Сухоруков В.П., Сухорукова А.Ф., Новиков Д.А., Деркачев А.С. Состав и минералогия гранитоидов Обь-Зайсанской складчатой области в связи с прогнозом радиоактивности подземных вод // Горные науки и технологии. 2024. Т. 9, № 2. С. 105–115.
8. Сухорукова А.Ф., Плаксина Н.А., Максимова А.А., Яндола Н.И. Гидрогеохимический мониторинг водозабора Новосибирского научного центра // Химия в интересах устойчивого развития. 2024. Т. 32, № 6. С. 783–792.
9. Токсичные элементы в подземных водах северных районов Обь–Зайсанской складчатой области / А.А. Максимова, А.В. Черных, Д.А. Новиков и др. // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, N. 5. С. 17–26.
10. Яндола Н.И., Новиков Д.А., Деркачев А.С., Дульцев Ф.Ф., Хвощевская А.А. Мышьяк в подземных водах правобережья р. Обь // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2025. № 3. С. 77–87.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ РОДНИКОВЫХ ВОД ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА МИКРОЧАСТИЦАМИ ПЛАСТИКА

Филимонова Е.А.¹, Репникова Д.А.¹, Толстунов М.И.²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

²Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону

Аннотация. В работе представлены результаты исследования частиц микропластика в родниковых водах юго-западной части Крыма. Отбор проб проведен на 13 точках в летний и зимний периоды. Экстракция частиц проводилась по стандартной методике, идентификация – методом пиролизической газовой хромато-масс-спектрометрии. Частицы микропластика обнаружены во всех пробах в виде волокон, фрагментов и пленок; первичный микропластик отсутствует. Идентифицированы полипропилен, полиэтилен, нейлон-66, полистирол и стирол-бутадиеновый каучук. Суммарная концентрация микропластика варьируется от десятых долей до первых единиц мкг/дм³. В родниках карстовых массивов концентрации ниже, чем в сложенных терригенными породами, что связано с особенностями транзита частиц. Полученные данные подтверждают уязвимость подземных вод даже на заповедных территориях.

Ключевые слова: подземные воды, микропластик, микроволокна, родники, карстовый водоносный горизонт

Abstract. This study presents microplastic particle analysis in spring waters in the South–Western Crimea. Water samples were collected from 13 springs during summer and winter periods. Microplastic extraction followed standard protocols, with identification conducted by pyrolysis gas chromatography–mass spectrometry. Microplastic particles—including fibers, fragments, and films—were found in all samples, while primary microplastics were not detected. The identified polymers included polypropylene, polyethylene, nylon–66, polystyrene. Concentrations ranged from tenths to a few micrograms per liter. Springs draining karst massifs exhibited lower microplastic concentrations compared to those in terrigenous rock settings, likely due to differences in particle transport pathways. These findings highlight the vulnerability of groundwater systems to microplastic contamination, even in protected natural areas.

Keywords: groundwater, microplastic, microfiber, springs, karst aquifer

В последние десятилетия проблема загрязнения окружающей среды приобрела глобальный характер, при этом особое внимание научного сообщества привлечено к контаминации поверхностных и подземных вод полимерными микрочастицами. Интенсивный рост мирового производства пластмасс (с 0.35 млн т в 1950 г. до 400 млн т в 2022 г.) обусловлен их универсальностью, легкостью и долговечностью [8]. Сложность утилизации полимерных отходов привела к их накоплению на свалках и попаданию в природную среду, а также последующему распространению в различных типах экосистем.

К микропластику (МП<5 мм) и нанопластику (НП<1 мкм) относится широкая группа синтетических полимеров, различающихся по химическому составу, морфологии (форма, цвет) и физико-химическим свойствам. В зависимости от генезиса частицы микропластика подразделяются на два типа: первичные и вторичные. Первичный микропластик — это частицы синтетических полимеров, изначально произведенные в микроскопическом диапазоне размеров: микрогранулы (пеллеты), используемые в качестве сырья в производстве пластмасс, а также компоненты косметических средств (скрабы), лекарственных препаратов, буровых растворов и промышленных абразивов. Вторичный микропластик образуется в результате деградации более крупных пластиковых отходов под воздействием факторов окружающей среды [2]. Основными источниками вторичного микропластика служат износ автомобильных шин, фрагментация пластикового мусора, выделение синтетических волокон при стирке и носке текстиля. Морфология вторичных частиц от первичного микропластика (микрогранулы) отличается большим разнообразием: они могут иметь форму волокон, фрагментов неправильной формы или тонких пленок.

Анализ полимерных частиц в водной среде включает три ключевых этапа: отбор проб, пробоподготовку и идентификацию частиц МП. В то время как для морских вод и донных отложений существует ряд стандартизированных методик [11], для изучения пресных поверхностных вод есть модифицированные рекомендации [1], для подземных вод разработанных методик нет. Традиционно для оценки МП в поверхностных водах

используют нейстонные сети или сеть Манта, ограничивающие нижний размер частиц в 300 мкм [7, 9], применяют также насосные фильтровальные установки с диаметром ячейки фильтра от 60 мкм [3]. Отбор подземных вод производится с помощью насосных фильтрационных установок при пробоотборе из скважин [5], либо пробы отбираются в емкости 1–5 л с последующей фильтрацией в лаборатории [6]. Учитывая малый размер порового пространства водовмещающих горных пород, для выделения частиц МП, рекомендуется применение фильтров с диаметром ячейки 1 мкм. На этапе экстракции выделяют частицы МП из пробы и проводят их подготовку к последующей идентификации. При исследовании поверхностных вод стандартный протокол обработки включает несколько последовательных этапов [1, 11]:

- окисление: деструкция органического материала с использованием 30 % раствора пероксида водорода (H_2O_2), часто в присутствии ионов $Fe(II)$ для катализа реакции. Для ускорения процесса пробу нагревают до 75 °С;
- химическая обработка: воздействие кислотами (HCl) или спиртами для удаления дополнительных загрязнений;
- флотация (сепарация по плотности): разделение частиц МП и минеральных зерен с использованием концентрированных растворов солей ($ZnCl_2$, $CaCl_2$, Li_2WO_4).

Некоторые этапы при отборе проб из подземных вод не применяются, так как в пробах содержится меньшее количество взвешенного вещества и органики по сравнению с поверхностными [5, 6]. Процедура идентификации частиц МП включает два последовательных этапа: визуальную характеристику и аналитическое детектирование. На первом этапе проводят микроскопическое исследование фильтра: выявляют частицы, предположительно являющиеся полимерными, и фиксируют их морфологические признаки: цвет, форму и размеры [5, 10]. Особое внимание уделяется форме частиц, поскольку данный параметр позволяет дифференцировать первичный и вторичный микропластик [10]. Определение химического состава полимерных частиц осуществляется с использованием таких методов, как:

- ИК-спектроскопия с преобразованием Фурье (μ -FTIR);
- рамановская спектроскопия (КР-спектроскопия);
- лазерная инфракрасная спектроскопия (LDIR);
- пиролизическая газовая хромато-масс-спектрометрия (Py-GC-MS)

В ряде случаев визуальный и аналитический методы совмещаются в рамках одного прибора. Примером такой интеграции служит спектрометрическая приставка EnSpectr R532, устанавливаемая на оптический микроскоп Olympus BX53M, что позволяет одновременно наблюдать морфологию частиц и проводить их спектральный анализ [5].

Исследуемая территория расположена в юго-западной части Крымского полуострова. В геологическом отношении выделяется два структурных этажа, нижний этаж сложен флишевыми отложениями T_3-J_1 , тектонически преобразованными терригенными отложениями (T_3-J_1es), вулканогенно-осадочными породами (J_2b); верхний этаж – карбонатными и терригенными породами от верхнеюрского до четвертичного возраста. Изучаемый район относится к Альминскому артезианскому бассейну (АБ) и Крымской сложной гидрогеологической области. В гидрогеологическом отношении нижний структурный этаж представляет собой слабопроницаемый цоколь, подстилающий разновозрастные водоносные горизонты верхнего структурного этажа.

Авторами исследовались пробы подземных вод из родников юго-западной части Крыма. Опробование проводилось в июне 2025 г. и в феврале 2026 г. В каждой точке отбирались пробы в 2-литровые стеклянные бутылки: по две пробы родниковой воды и одна холостая проба для контроля внешнего загрязнения. Было опробовано 13 родников.

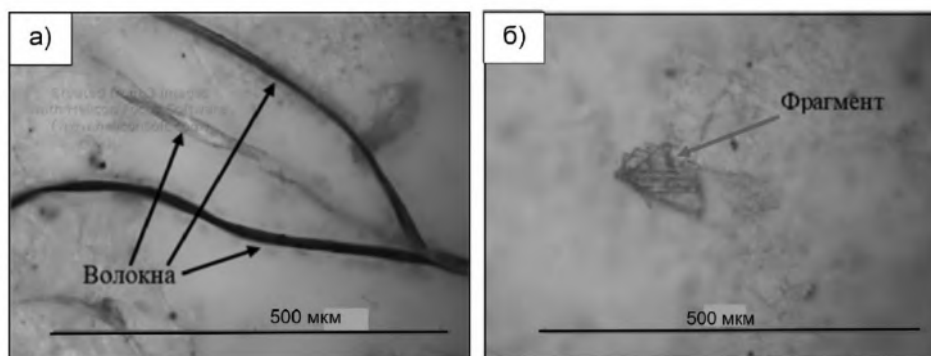
Экстракция частиц микропластика проводилась по стандартной методике. Визуальное детектирование проводилось на поляризационном петрографическом микроскопе «Nikon Eclipse LV100N POL» с увеличением 20х с разным фокусом. Наложение снимков

выполнялось в программе «Helicon Focus». Идентификация химического состава осуществлялась методом пиролитической газовой хромато-масс-спектрометрии. Хроматография выполнялась на газовом хроматографе «Маэстро ГХ» с тройным квадрупольным масс-спектрометрическим детектором «Маэстро МСД», оснащенный источником электронной ионизации. Интерпретация полученных спектров осуществлялась при помощи программного комплекса «Маэстро», а также Search-MPs Frontier Lab.

Краткие данные о дате и место пробоотбора родниковых вод

№ пробы	Название родника	Дата отбора	Место отбора	
П1–1	Пания	Июнь 2025	44°31'19.55"	34° 0'11.96"
П1–2	Источник Скельский	Июнь 2025	44°27'54.1"	33°51'30.0"
П1–3	Родник у Демерджи	Июнь 2025	44°45'9.92"	34°23'37.37"
П2–1	Источник Скельский	Февраль 2026	44°27'54.1"	33°51'30.0"
П2–2	Родник Ашлама (Бахчисарай)	Февраль 2026	44°44'50.8"	33°54'2.05"
П2–3	Кулю–Буруновский родник	Февраль 2026	44°37'15.2"	33°52'22.6"
П2–4	Родник Арабский	Февраль 2026	44°45'34.4"	33°45'17.5"
П2–5	Сероводный источник (Верхнесадовое)	Февраль 2026	44°41'15.9"	33°42'23.5"
П2–6	Джавезлык	Февраль 2026	44°40'41.0"	33°38'42.9"
П2–7	Родник у Геологов	Февраль 2026	44°51'41.9"	34°20'3.6"
П2–8	Родник Святой	Февраль 2026	44°51'39.4"	34°20'35.5"
П2–9	Родник Ай–Димитрий	Февраль 2026	44°29'51.6"	34°6'51.5"
П2–10	Родник Хатибин–Копуру	Февраль 2026	44°53'49.4"	34°39'58.0"

Визуальный анализ показал наличие потенциальных частиц микропластика во всех пробах. Обнаружены волокна, пленки и фрагменты (рисунок). Микрогранулы не выявлены, что указывает на отсутствие первичного микропластика. По результатам Р_у–ГХ–МС были идентифицированы частицы полипропилена (PP), полиэтилена (PE), полиамида–66 (N66), полистирола (PS), стирол-бутадиенового каучука (SBR).



Частицы микропластика, обнаруженных в подземных водах: а – волокна, б – фрагмент.

Территория Альминского артезианского бассейна испытывает локальную антропогенную нагрузку в отличие от Горного Крыма, который является заповедной зоной, что сводит к минимуму вероятность загрязнения на месте. С другой стороны, не исключается возможность переноса полимерных частиц от удаленных источников. Ближайшими источниками микропластика являются туристические стоянки и дорожное полотно; например, обнаружение стирол-бутадиенового каучука в родниковой воде объясняется смывом водными потоками частиц износа автомобильных шин с дорожного полотна. Полистирол и полиэтилен широко применяются в качестве одноразовых упаковочных материалов и часто встречаются в бытовых отходах, фрагментация полимерных отходов – основной источник поступления в окружающую среду этих полимеров. Нейлон–66 широко

используется в производстве синтетических тканей (одежда, ковры, обивочные материалы). При эксплуатации текстильных изделий происходит отделение микроволокон, которые попадают в окружающую среду и переносятся воздушными или водными потоками.

Концентрация полимерных частиц варьируется от десятых мкг/дм³ до первых мкг/дм³. Сравнение концентрации микропластика в карстовых родниках и родниках, приуроченных к терригенным водоносным горизонтам, показывает значительно более высокие концентрации в последних. Данный результат, вероятно, связан с более длинными путями переноса полимерных частиц в карстовых родниках. Карстовые родники в Горном Крыму находятся в зоне разгрузки потоков подземных вод из смежных тектонических блоков, которые подтверждены многочисленными трассерными исследованиями [4].

Путями транспортировки частиц МП являются воздушные потоки, атмосферные осадки, поверхностный и подземный сток. Важную роль играют Крымские горы, которые являются естественной преградой на пути распространения воздушного потока. Частицы МП могут накапливаться в облаках и переноситься вместе с ними с преобладающими ветрами, после чего выпадают с твердыми и жидкими осадками на склоны Крымских гор. В процессе инфильтрации частицы полимеров либо сразу попадают в водоносный горизонт и перемещаются с подземным стоком, либо переносятся вместе с поверхностным стоком по горным склонам до открытых карстовых форм рельефа, которые способствуют быстрому и сосредоточенному поступлению полимерных частиц в водоносный горизонт. Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что даже в условиях минимальной антропогенной нагрузки в родниковых водах присутствуют частицы микропластика. Это подтверждает высокую уязвимость подземных вод. Полученные данные демонстрируют, что атмосферный перенос и поверхностный сток являются значимыми путями поступления микрочастиц в водоносные горизонты Горного Крыма. Различия в концентрациях микропластика в родниках, приуроченных к карбонатным или терригенным породам, указывают на влияние гидрогеологических условий на транспорт полимерных частиц.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25–27–00532)

Список литературы

1. Зобков М.Б., Есюкова Е.Е. Микропластик в морской среде: обзор методов отбора, подготовки и анализа проб воды, донных отложений и береговых наносов // Океанология. 2019. Т. 58, № 1. С. 149–157.
2. Казак Е.С., Филимонова Е.А., Преображенская А.Е. Микро- и нанопластик в природных водах России и проблемы его определения // Вестник Московского университета. 2022. № 6. С. 110–124.
3. Тихонова Д.А., Каретников С.Г., Иванова Е.В., Шалунова Е.П. Вертикальное распределение микропластика в водной толще Ладожского озера // Водные ресурсы. 2024. Т. 51, № 2. С. 225–232.
4. Токарев С.В. Уязвимость карстовых подземных вод Горного Крыма к загрязнению: выявление, оценка и картирование: дис. ... канд. геогр. наук. Симферополь, 2020. 186 с.
5. Филимонова Е.А., Гутникова Л.О., Преображенская А.Е. и др. Исследование частиц микропластика в трещинно-карстовом водоносном горизонте (г. Звенигород, Россия) // Водные ресурсы. 2025. № 3. С. 100–111.
6. Филимонова Е.А. Загрязнение частицами микропластика подземных вод // Экологические проблемы природопользования. Геоэкология – 2025. Труды международной молодежной научной конференций памяти профессора В.В. Куриленко. СПб.: ООО Изд-во ВВМ, 2025. С. 90–96.
7. Filimonova E.A., Preobrazhenskaya A.E., Gutnikova L.O. Microplastics in Russian freshwater systems: a review // RJES. 2024. Vol. 24, No. 3. P. 1–23.
8. Houssini K., Li J., Tan Q. Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis // Commun Earth Environ. 2025. 6. 257.
9. Lisina A.A., Platonov M.M., Lomakov O.I., Sazonov A.A., Shishova T.V., Berkovich A.K., Frolova N.L. Microplastic abundance in Volga river: results of a pilot study in summer // Geography, environment, sustainability. 2020. Vol. 14. P. 82–93.
10. Lusher A.L., Bråte I.L.N., Munno K. et al. Is It or Isn't It: The Importance of Visual Classification in Microplastic Characterization // Applied Spectroscopy. 2020. Vol. 74 (9). P. 1139–1153.
11. Masura J., et al. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48. 2015.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ РОДНИКОВЫХ ВОД ВОСТОЧНЫХ РАЙОНОВ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ ХИМИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ I КЛАССА ОПАСНОСТИ

Черных В.В.

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск,
viktoria.chern01@mail.ru*

Аннотация. Исследовано распределение веществ I класса опасности в природных водах восточных районов Новосибирской области, где немаловажную роль в загрязнении играет не только антропогенный фактор, но и природный. Проведена оценка территории с выделением районов с показателями, соответствующими нормативам качества воды, и районов с превышением ПДК загрязняющих веществ. Результаты исследования будут использованы при оценке качества природных вод в целях питьевого и хозяйственного-бытового нецентрализованного использования.

Ключевые слова: *подземные воды, родниковые воды, гидрохимия, экологическое состояние, высокотоксичные элементы, Новосибирская область*

Abstract. The distribution of pollutants of hazard class I in the natural waters of the eastern regions of the Novosibirsk region, where not only anthropogenic but also natural factors play an important role in pollution, has been studied. An assessment of the territory was carried out, identifying areas that meet water quality standards and areas that exceed the maximum permissible concentration of pollutants. The results of the study will be used in assessing the quality of natural waters for drinking and household non-centralized use.

Keywords: *ground water, spring water, hydrochemistry, ecological status, highly toxic elements, Novosibirsk region*

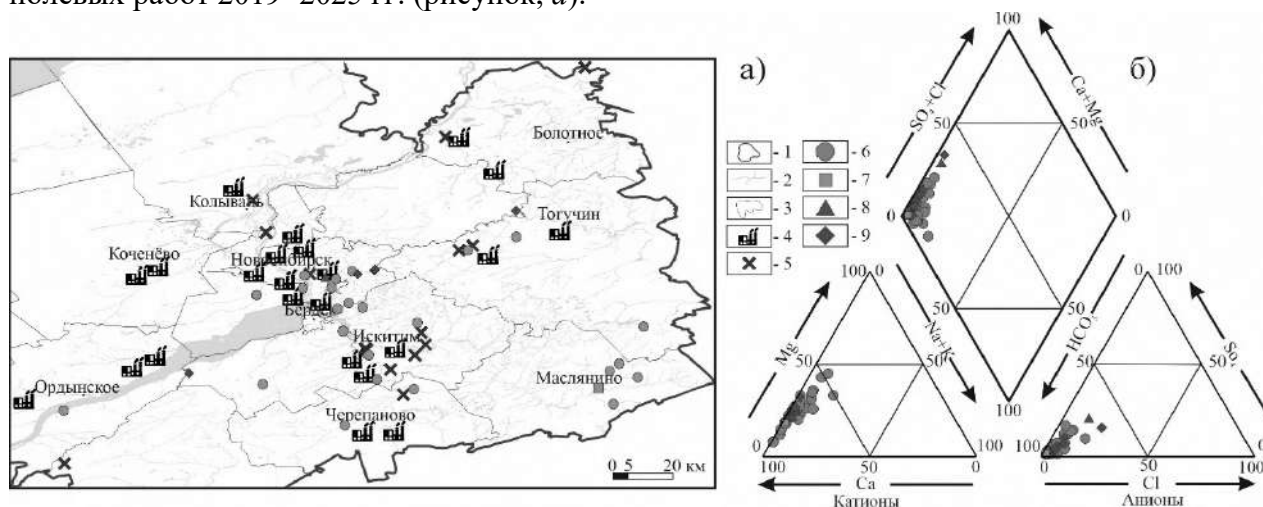
Значительная часть населения России использует воду нецентрализованных источников водоснабжения. Это обеспечивает независимость от центральных сетей, однако обуславливает необходимость организации систематического мониторинга качества воды и соблюдения санитарных зон. Актуальность данной проблемы характерна и для Новосибирской области. На территории области ведется разработка таких полезных ископаемых, как каменный уголь, тугоплавкие глины, торф, нефть. На северо-западе области открыты месторождения природного газа. В муниципальных районах и городских округах области функционируют предприятия всех отраслей экономики. В последние годы активно развиваются логистические центры – транспортные узлы авиа-, железнодорожного и автомобильного транспорта. В 18 из 30 муниципальных районов ведущей отраслью экономики является сельское хозяйство [4]. Также существует геологическая особенность данной территории – распространение гранитных массивов, что является причиной загрязнения подземных вод радиоактивными элементами и продуктами их распада.

Целью данной работы является изучение химического состава родниковых вод, анализ содержания в них элементов первого класса опасности – Be, Cd, Hg, Tl, Pb, U, оценка экологического состояния вод и потенциальных источников загрязнения. Повышенные концентрации данных элементов являются опасными для здоровья населения. Металлы первого класса опасности, накапливаясь в организме, вызывают тяжелые хронические заболевания и генетические мутации [1]. Также в работе проанализирована активность Rn, так как в изучаемом регионе повышен фон радиоактивных элементов в водах. В пределах Новосибирской области выявлено 12 проявлений радоновых вод с концентрацией ^{222}Rn от 2 до 25 220 Бк/дм³, с 2018 г. активную работу по их изучению ведет коллектив лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СО РАН [5–9, 12]. Воздействие радиации на здоровье человека зависит от уровня поглощаемой дозы, продолжительности действия ионизирующих лучей на организм в целом и на отдельные его органы, радиочувствительности и радиорезистентности клеток, тканей, органов или всего организма к воздействию излучения. Ионизирующая радиация – доказанный фактор риска злокачественных опухолей. Риск онкозаболеваний имеет повышенный уровень у людей, подвергающихся влиянию ионизирующей радиации всех видов. Согласно оценкам Научного комитета ООН по воздействию атомной радиации, более 98 % дозы облучения населения

приходится на природные источники радиации, что обуславливает повышенный интерес научного сообщества к радиологическому качеству питьевой воды.

Восточная часть Новосибирской области обладает разветвленной речной сетью, включающей бассейны Оби, Ини, Берди и многочисленные малые реки и озера. Восток исследуемой территории приурочен к Кузнецкой ГСО и имеет весьма сложное гидрогеологическое строение [3, 13]. В геологическом строении региона принимают участие отложения палеогена и неогена, которые перекрывают различные по составу и генезису породы складчатого фундамента раннедевонско-раннетриасового возраста. Также широкое распространение имеют гранитоиды Приобского и Барлакского комплекса, прорывающие дислоцированные вулканогенно-осадочные толщи. В ландшафтном отношении это возвышенность Сокур, Буготакские сопки и Присалаирская предгорная равнина.

Фактическим материалом для настоящего исследования послужили результаты химико-аналитических исследований 57 проб родниковых вод, отобранных во время полевых работ 2019–2025 гг. (рисунок, а).



Карта фактического материала (а), диаграмма Пайпера состава родниковых вод (б).

Границы: 1 – Новосибирской области, 3 – районов области; 2 – гидросеть, 4 – промышленные предприятия, 5 – карьеры, родники по загрязненности элементами I класса опасности: 6 – чистые, 7 – слабо загрязненные, 8 – умеренно загрязненные, 9 – с превышением по радону.

Пробоотбор совершался из 30 разных источников. Больше всего мониторинговые работы в разные годы проводились на Святом источнике в с. Верх-Тула (11 проб) и Инских источниках (13 проб). В 2026 г. исследования продолжаются в левобережных районах р. Оби. Оценка превышения ПДК выполнена в соответствии с нормами [1, 2, 10, 11]. Изученные пробы были разделены на четыре геохимические выборки, соответствующие разной степени загрязненности вод. При оценке загрязненности учитывался коэффициент превышения предельно допустимой концентрации (ПДК) по каждому элементу. Преобладают воды гидрокарбонатного кальциевого состава (66 %), также установлены воды гидрокарбонатного кальциево-магниевого состава (30 %), гидрокарбонатного кальциево-магниево-натриевого состава (2 %) и гидрокарбонатного кальциево-натриевого состава (2 %) (рисунок, б).

К первой группе относятся чистые воды (46 проб). В них не найдены превышения ПДК по изучаемым элементам (таблица). По химическому типу преобладают воды гидрокарбонатного кальциевого состава (55 %), также есть воды гидрокарбонатного кальциево-магниевого состава (27 %) и гидрокарбонатного кальциево-магниево-натриевого состава (18 %). Минерализация этой группы лежит в диапазоне от 320 до 757 мг/дм³. Значение водородного показателя 7.17–8.10, это определяет воды как слабощелочные. Eh

варьируется от –90 до +273 мВ. Содержание радона в этих пробах тоже соответствует нормам, максимальное значение 56 Бк/дм³, это значение близко к предельно допустимому.

Ко второй выборке относится проба, отобранная в с. Суенга Маслянинского района. В ней найдено превышение Ве в полтора раза. По химическому типу проба имеет гидрокарбонатный кальциевый состав. Минерализация составляет 557 мг/дм³, рН воды равен 7.34, Eh +263.7. Активность радона этой пробы слабая и составляет 7 Бк/дм³.

Третья группа характеризуется превышением урана, воды были отобраны из родника (с. Новолуговое Первомайского района, г. Новосибирск) с разницей 1 год. В пробах зафиксировано превышение ПДК по урану в 2-3 раза. Пробы по химическому типу имеет гидрокарбонатный кальциевый состав и гидрокарбонатный кальциево-натриевый состав с минерализацией 1043 мг/дм³. По водородному показателю воды слабощелочные, Eh +260 мВ. Значения радона в пробах также находятся в пределах нормы и составляют от 19 до 31 Бк/дм³.

В отдельную четвертую группу объединены родниковые воды с превышением ПДК по радону (8 проб). Воды отобраны из родников с. Кайлы Мошковского района, пос. Факел Революции Искитимского района и из Инских источников на территории пос. Березовка Новосибирского района (источник № 1 и № 4). По химическому типу преобладают воды гидрокарбонатного кальциевого состава (75 %), также есть воды гидрокарбонатного кальциево-магниевого состава (25 %). Минерализация колеблется в пределах 421–838 мг/дм³. По водородному показателю воды слабощелочные, Eh находится в диапазоне +124.5...+226.4 мВ. Активность радона оценивается в 65–139 Бк/дм³, превышение допустимых концентраций достигает 2.3 раза.

Диапазон изменения рассмотренных химических элементов в родниковых водах

Г Р У П П А	Rn, Бк/дм ³	Ве, мкг/д м ³	U	I	As	Se	Fe	Al	Cr	Mn	C _{орг}
			мг/дм ³								
1	<u>0-56</u> 21	<u>0-0.07</u> 0.01	<u>0-0.01</u> 0.004	<u>0-0.255</u> 0.03	<u>0-0.04</u> 0.002	<u>0-0.011</u> 0.0009	<u>0.05-4.7</u> 0.5	<u>0-0.8</u> 0.03	<u>0-0.2</u> 0.02	<u>0-0.9</u> 0.17	<u>0.1-13.6</u> 7
2	7	0.3	0.003	0.03	0.0015	0.0003	1.19	0.943	0.005	0.237	14.9
3	25	0	0.04	0.03	0.0002	0.0003	0.24	0.0056	0.0035	0.001	31.2
4	65-139 98.7	<u>0-0.014</u> 0.007	<u>0-0.006</u> 0.004	<u>0-0.03</u> 0.011	<u>0-0.001</u> 0.0003	<u>0-0.004</u> 0.0006	<u>0.07-0.5</u> 0.2	<u>0-0.08</u> 0.01	<u>0-0.04</u> 0.01	<u>0-0.004</u> 0.0016	<u>0-10</u> 4.7

Примечание. Значения: в числителе – предельные, в знаменателе – средние. Жирным шрифтом указаны превышения по ПДК.

Из общего числа изученных проб в пределах восточной части Новосибирской области большинство являются чистыми (81 %). Загрязнение отмечается по трем показателям – Ве, U, Rn. Все три элемента – сильные канцерогены, повреждающие ДНК клеток, а также являющиеся причиной возникновения рака легких, даже низкие концентрации в течение длительного времени могут повышать риск развития онкологических заболеваний, так как эти элементы способны к накоплению в организме человека. Загрязненные источники, не пригодные для хозяйственно-бытовых нужд, расположены в с. Суенга Маслянинского района, с. Кайлы Мошковского района, пос. Факел Революции Искитимского района, пос. Березовка Новосибирского района. Несмотря на то, что основная масса исследованных проб не содержит загрязнителей I класса опасности, в них установлены превышения ПДК по множеству химических элементов других классов опасности. Примерно в одной трети проб наблюдается превышение ПДК по содержанию растворенных органических веществ (C_{орг}). Кроме того, выявлены превышения по элементам II класса опасности – I, As, Se, по элементам III класса опасности – Fe, Al, Cr и по элементам IV класса опасности – Mn

(таблица). Таким образом, из общей выборки (57 проб) лишь 29 % проб могут быть классифицированы как абсолютно чистые. Выявленные гидрогеохимические аномалии требуют дополнительных мониторинговых исследований в зависимости от сезона года.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-17-20024) и правительства Новосибирской области (проект № 30-2025-000896).

Список литературы

1. ГОСТ 12.1.007-76. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. М.: Стандартинформ, 2007.
2. ГОСТ Р 51232-98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. М.: Стандартинформ, 2008.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Г.А. Бабин, А.И. Черных, А.Г. Головина, С.В. Жигалов и др. / Серия Алтае-Саянская. Лист N-44 – Новосибирск. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. 392 с. + 4 вкл.
4. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды новосибирской области в 2024 году. Новосибирск: Министерство природных ресурсов и экологии Новосибирской области. 2025. 250 с.
5. Деркачев А.С., Максимова А.А., Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Сухорукова А.Ф., Черных А.В. Природа радиоактивности дренажных вод карьеров Новосибирской области // Горные науки и технологии. 2022. 7. № 3. С. 216–230.
6. Дульцев Ф.Ф., Новиков Д.А. Радиологическая опасность природных вод восточных районов Новосибирской области // Георесурсы. 2025. Т. 27, № 4. С. 306–320.
7. Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Вакуленко Л.Г., Сухорукова А.Ф., Пыряев А.Н., Максимова А.А., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В. Изотопно-геохимические особенности проявления слаборадоновых вод «Инские источники» (юг Западной Сибири) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 3. С. 135–145.
8. Новиков Д.А., Пыряев А.Н., Максимова А.А., Сухорукова А.Ф., Дульцев Ф.Ф., Деркачев А.С., Черных А.В., Хвашевская А.А. Об открытии слаборадоновых вод – Седова заимка // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 12. С. 61–73.
9. Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Корнеева Т.В., Каменова-Тотцева Р., Максимова А.А., Деркачев А.С., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В. Гидрогеология и гидрогеохимия месторождения минеральных радоновых вод «Каменское» (г. Новосибирск) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 4. С. 192–208.
10. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 28.01.2021.
11. СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению населения, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий: утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 28.01.2021 (с изменениями на 29 декабря 2025 г.).
12. Nikitenkov A.N., Novikov D.A., Korneeva T.V., Dultsev F.F. Numerical physicochemical modeling of the geochemical behavior of uranium and thorium in radon waters of southern Siberia // Aquatic Geochemistry. 2025. Vol. 31, Iss. 1. № 6. DOI: 10.1007/s10498-025-09440-3.
13. Novikov D.A., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F., et al. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia // Groundwater for Sustainable Development. 2021. Vol. 15, № 100674.

МЫШЬЯК В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

Яндола Н.И.

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск,
yandolani@ipgg.sbras.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты изучения распределения мышьяка в подземных водах восточных районов Новосибирской области. По данным исследований установлено, что концентрации мышьяка варьируются от $1.2 \cdot 10^{-5}$ до 0.32 мг/дм³ (среднее 0.014 мг/дм³). В 158 пробах (21 %) зафиксировано превышение ПДК (0.01 мг/дм³), при этом в отдельных районах отмечены превышения более чем в 10 раз. Согласно оценке рисков для здоровья населения, большая часть территории находится в зоне среднего и высокого риска для здоровья.

Ключевые слова: гидрогеохимия, мышьяк, канцерогенный риск, коэффициент опасности, Новосибирская область

Abstract. This paper presents the results of a study of the distribution of arsenic in groundwater in the eastern regions of the Novosibirsk Oblast. According to studies, arsenic concentrations vary from $1.2 \cdot 10^{-5}$ to 0.32 mg/L (average 0.014 mg/L). In 158 samples (21 %), the MPC (0.01 mg/L) was exceeded, with exceedance more than 10 times in some areas. According to the health risk assessment, most of the territory is in the medium and high health risk zone.

Keywords: hydrogeochemistry, arsenic, carcinogenic risk, hazard coefficient, Novosibirsk Region

По данным ВОЗ, как минимум 140 миллионов человек в 70 странах мира употребляют воду, содержащую мышьяк в концентрациях, превышающих предельно допустимую (0.01 мг/дм³ согласно рекомендации ВОЗ [9]), и Россия не является исключением [1, 2, 13]. Его природная неорганическая форма высокотоксична, она является естественным загрязнителем окружающей среды и концентрируется в подземных водах. Это связано с процессами взаимодействия в системе вода – порода и благоприятными физическими и геохимическими условиями водоносных горизонтов для его аккумуляции [10].

Регулярное употребление воды, содержащей мышьяк, увеличивает вероятность развития сердечно-сосудистых, неврологических и репродуктивных нарушений [7, 8], сахарного диабета [11], поражений печени, легких, кровеносной системы, а также онкологических заболеваний [7, 8]. Настоящая работа опирается на уже накопленный в ходе предыдущих исследований Новосибирской области обширный фактический материал [2–5, 12, 14].

Территория исследований включает восточную часть Новосибирской области. В нее входит сам город Новосибирск, а также ее районы: Новосибирский, Искитимский, Черепановский, Маслянинский, Сузунский, Болотнинский, Мошковский, Колыванский, Коченевский, Чулымский и Ордынский. В геологическом строении региона принимают участие отложения палеогена и неогена, которые перекрывают различные по составу и генезису породы складчатого фундамента раннедевонско-раннетриасового возраста. Широкое распространение имеют гранитоиды Приобского и Барлакского комплексов, прорывающие дислоцированные вулканогенно-осадочные толщи. В ландшафтном отношении – это возвышенность Сокур, Буготакские сопки, Присалаирская предгорная равнина и Барабинские лесостепи.

Материалами для настоящего исследования послужили результаты химико-аналитических исследований 778 проб подземных вод из скважин, источников и колодцев, которые используются местными жителями в питьевых целях. Пробы были отобраны в ходе экспедиционных работ 2022–2025 гг. Непосредственно на объектах было выполнено определение pH, Eh, температуры, содержания растворенного O₂ с помощью оборудования (мультипараметровый измеритель pH/ОВП/проводимости Hanna HI98195 и оксиметр Hanna HI98198) и полевой гидрогеохимической лаборатории. Последующее лабораторное изучение

химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ.

В ходе исследования была определена оценка риска для здоровья населения согласно Руководству по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду [6]. Расчет индивидуального канцерогенного риска (CR) производился по формуле:

$$CR_{As} = LADD \cdot SFo,$$

где LADD – среднесуточная доза в течение жизни, мг/(кг·сут.); SFo – фактор наклона (мг/(кг·сут.))⁻¹, характеризующий степень увеличения вероятности развития рака при воздействии канцерогена. Фактор наклона составляет 1.5 (мг/(кг·сут.))⁻¹ для мышьяка.

Расчет риска развития неканцерогенных эффектов (HQ) производился по формуле:

$$HQ_{As} = LADD/RfD,$$

где RfD – референтная (безопасная) суточная доза. Для мышьяка RfD составляет 0.0003 мг/(кг·сут.).

Среднесуточная доза в течение жизни (LADD) рассчитывалась по формуле:

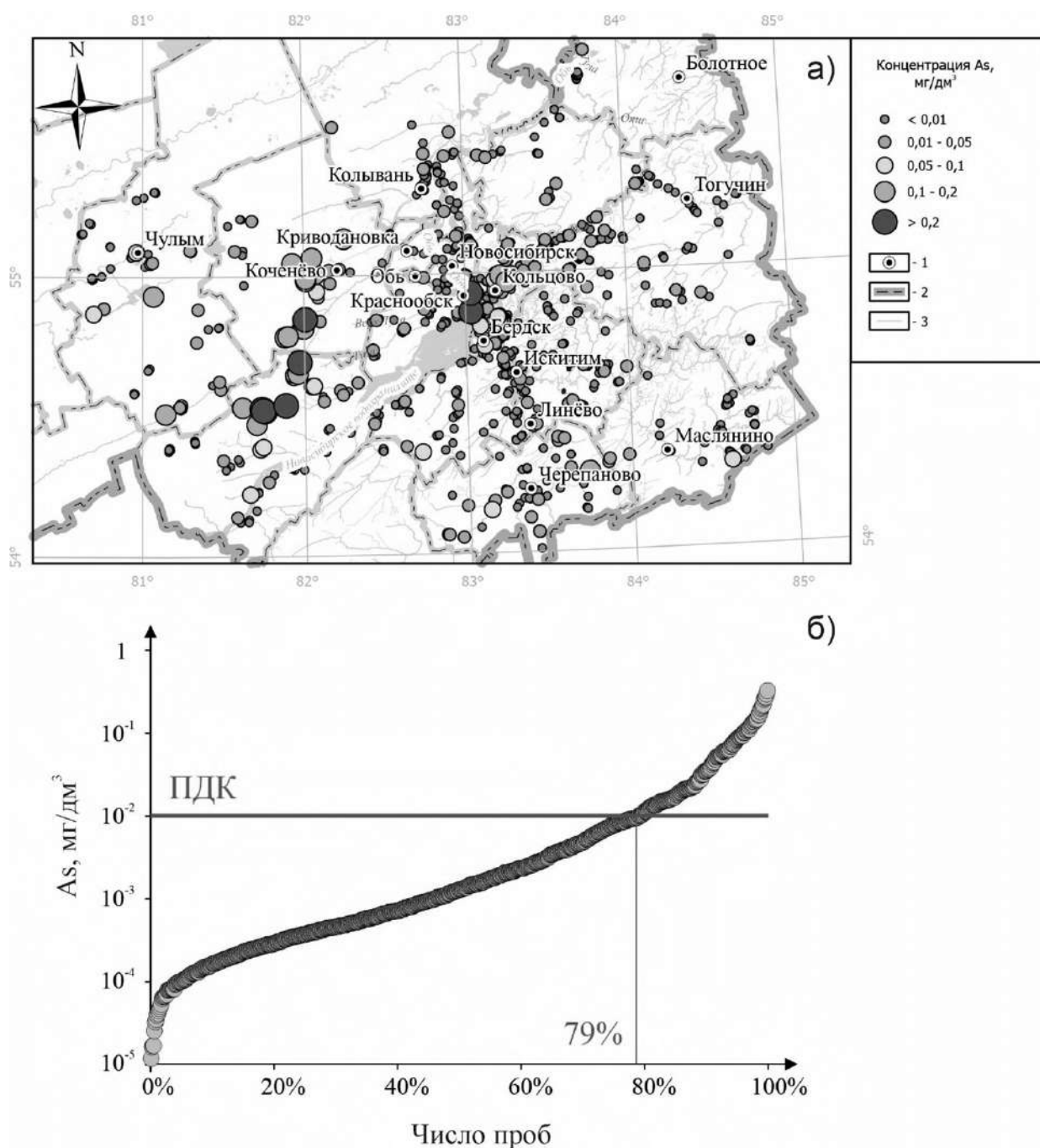
$$LADD = (C \cdot WI \cdot EF \cdot ED)/(BW \cdot AT \cdot 365),$$

где C – концентрация вещества в воде, мг/дм³; WI – потребление воды, л/день, принимаемое как 2 л/день; EF – частота воздействия, дней/год, принимаемая как 350 дней в год; ED – продолжительность воздействия, лет, принимаемая как 30 лет; BW – средняя масса тела, кг, принимаемая как 60 кг; AT – период усреднения экспозиции, принимаемый за 30 лет; 365 – число дней в году.

Диапазон изменения концентраций мышьяка в подземных водах исследуемого региона составляет от 1.2·10⁻⁵ до 0.32 мг/дм³ со средним значением в 0.014 мг/дм³ (рисунок). В 158 (21 %) пробах обнаружено превышение ПДК в 0.01 мг/дм³. В 2025 г. было начато систематическое изучение этой актуальной для нашей местности проблемы. Были оценены концентрации мышьяка в водопунктах, которые используются населением в качестве источника питьевой воды, а также рассчитаны коэффициенты развития канцерогенных и неканцерогенных эффектов (CR и HQ). Проведенный расчет рисков показал, что большая часть территории находится в зоне среднего и высокого риска для здоровья (CR > 10⁻⁵). В целом значения коэффициента канцерогенного риска (CR) изменяются в диапазоне от 2.4·10⁻⁷ до 7·10⁻³ со средним значением 2.8·10⁻⁴. В отдельных районах (Советский район г. Новосибирска, Черепановский, Коченевский, Ордынский, Чулымский район НСО) наблюдаются превышения ПДК по мышьяку более чем в десять раз. Более того, в Ордынском и Коченевском районах фиксируются закономерные превышения во многих населенных пунктах, достигающие местами 32 ПДК (п. Петровский Ордынского района), в связи с чем эти территории находятся в зоне очень высокого уровня канцерогенного риска. Природа этого явления на левобережье Оби требует дальнейшего изучения.

Рассчитанные значения коэффициента опасности для перорального воздействия (HQ) изменяются от 0.0008 до 21.14. Значения коэффициента выше 1 (что указывает на средний и высокий риск для здоровья) зафиксированы в 125 из 754 проб, сохранение текущего уровня поступления мышьяка с водой в организм может привести к развитию заболеваний кожи, иммунной, сердечно-сосудистой, эндокринной, центральной нервной системы и желудочно-кишечного тракта.

Таким образом, в 21 % изученных проб региона наблюдаются превышения предельно допустимой концентрации мышьяка, которые в единичных случаях могут достигать 32 раз. Оценка риска указывает на возможные негативные последствия для здоровья населения при регулярном употреблении воды имеющегося качества. На действующих скважинах с ненадлежащим качеством вод рекомендуется применять системы обратного осмоса и нанофильтрации в сочетании с непрерывным мониторингом качества воды. Результаты подтверждают необходимость детального изучения геохимических особенностей территории исследования, механизмов миграции мышьяка, его источников и процессов взаимодействия с другими токсичными металлами.



Карта распределения (а), кумулятивная кривая (б) содержания мышьяка в подземных водах.
1 – населенные пункты, 2 – границы муниципальных районов, 3 – гидросеть.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-17-20024) и правительства Новосибирской области (проект № 30-2025-000896).

Список литературы

1. Абдулмуталимова Т.О., Ревич Б.А., Газалиев И.М. Мышьяк в питьевых артезианских водах Северного Дагестана и риски здоровью населения // Разведка и охрана недр. 2018. № 1. С. 37–40.
2. Максимова А.А., Черных А.В., Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Деркачев А.С., Сухорукова А.Ф., Никитенков А.Н., Хващевская А.А. Токсичные элементы в подземных водах северных районов Обь-Зайсанской складчатой области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 5. С. 1–726.
3. Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Вакуленко Л.Г., Сухоруков В.П., Фомина Я.В., Яндола Н.И., Максимова А.А., Черных А.В., Сухорукова А.Ф., Деркачев А.С. Радиоактивность водовмещающих пород Обь-

- Зайсанской складчатой области // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2024. № 1(57). С. 110–120. DOI: 10.20403/2078-0575-2024-1-110-120.
4. Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В. Распределение урана в системе вода-горная порода в пределах Обь-Зайсанской складчатой области // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28, № 12. С. 34–39. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-12-34-39.
5. Новиков Д.А., Вакуленко Л.Г., Максимова А.А., Николенко О.Д., Деркачев А.С., Фомина Я.В. (Садыкова), Хвашевская А.А. Распределение химических элементов в системе вода-порода (на примере Железнодорожного ключа в долине реки Ини) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336, № 2. С. 201–214.
6. Р 2.1.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 143 с.
7. Arcella D., Cascio C., Ruiz J.A.G. Chronic dietary exposure to inorganic arsenic // EFSA J. 2021. Vol. 19, № 1. Art. 6380. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6380>.
8. Arsenic (addendum) safety evaluation of certain contaminants in food // WHO Food additives series: 63. FAO JECFA Monographs 8. Geneva: World Health Organization, 2011. P. 153–316.
9. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. Geneva: WHO, 2017. 631 p.
10. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Some drinking-water disinfectants and contaminants, including arsenic. Lyon, 2004.
11. Liu S., Guo X., Wu B., Yu H., Zhang X., Li M. Arsenic induces diabetic effects through beta-cell dysfunction and increased gluconeogenesis in mice // Sci. Rep. 2014. Vol. 4. Art. 6894. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep06894>.
12. Novikov D.A., Pyryaev A.N., Sukhorukov V.P., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Sukhorukova A.F., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Khvashchevskaya A.A., Medeshova N.A. Role of the Water–Rock System in the Formation of the Composition of Radon Water of the Tulinskoe Field (Novosibirsk) // Russian Geology and Geophysics. 2024. Vol. 65, № 12. P. 1503–1518. DOI: <https://doi.org/10.2113/RGG20244716>.
13. Podgorski J., Berg M. Global threat of arsenic in groundwater // Science. 2020. Vol. 368, № 6493. P. 845–850. DOI: 10.1126/science.aba1510.
14. Sukhorukov V.P., Sukhorukova A.F., Novikov D.A., Derkachev A.S. Composition and mineralogy of granitoids of the Ob-Zaisan folded region in the context of the prediction of groundwater radioactivity // Mining Science and Technology (Russia). 2024. Vol. 9, № 2. P. 105–115. DOI: <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-208>.

VIII. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАНОВО-ИЗОЛИРОВАННЫХ ПЛАСТОВ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ НА ПРИМЕРЕ ВОДОЗАБОРА В РЕСПУБЛИКЕ САХА (ЯКУТИЯ)

Аксеновская А.А.¹, Смагина Т.Н.², Савельев Е.А.²

¹ООО «ТЮНГД», Якутск, office@tyngd.rosneft.ru

²ООО «РН-ГИР», Тюмень, rn-gir@rosneft.ru

Аннотация. В статье кратко рассматривается история изучения и эксплуатации Среднеботуобинского месторождения технических подземных вод с очень сложными геолого-гидрогеологическими условиями, результатом схематизации которых является разработанная численная геофильтрационная модель. При ее разработке понадобились нестандартные подходы для наилучшего приближения численной симуляции к существующим условиям и данным техногенной нагрузки. Используемые подходы описаны и обобщены для обеспечения возможности их практического применения на объектах-аналогах.

Ключевые слова: Якутия, криолитозона, талик, водозабор, геофильтрационная модель

Abstract. This article provides a short review of the history of research and exploitation of the Srednebotuobinskoye technical groundwater field, a site distinguished by the high complexity of its geo-hydrogeological conditions. The resulting schematic representation is a numerical geofiltration model developed for this deposit. In creating this model, non-standard approaches were required to best approximate the numerical simulation to the prevailing conditions and to the data on technogenic load. The employed methods are described in detail and generalized to enable their practical application at analogous sites.

Keywords: Yakutia, permafrost zone, talik, water intake, geofiltration model

Рассматриваемый водозабор предназначен для технологического водоснабжения системы поддержания пластового давления при разработке Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения в Мирнинском и Ленском районах Республики Саха (Якутия). Разработка месторождения осуществляется ООО «Таас-Юрях Нефтегазодобыча». К настоящему времени водозабор состоит из 38 скважин. Его суммарная фактическая производительность достигает 15 тыс. м³/сут при одновременной работе 26 скважин. Водозабор эксплуатируется уже десять лет и демонстрирует устойчивость напорного режима каптируемых водоносных отложений, несмотря на интенсивную техногенную нагрузку.

Объектом эксплуатации является средне- верхнекембрийский локально-водоносный горизонт, представленный отложениями бордонский свиты (верхоленской и илгинской нерасчлененных свит). Подразделение сложено чередующимися пачками мергелей, аргиллитов, известняков и песчаников с неравномерной трещиноватостью карбонатной части коллектора. Общая мощность водоносного горизонта в пределах рассматриваемого участка составляет от 50 до 235 м. Его кровля залегает на абсолютных отметках от +275 до +381 м, подошва – от +140 до +275 м. Сверху он перекрыт выходящими на дневную поверхность терригенными отложениями укугутской свиты нижнеюрского возраста мощностью до 57 м, через которые осуществляется инфильтрация атмосферных осадков.

Территория находится в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП). Целевой объект заморожен на всю мощность в области эрозионного вреза постоянных водотоков (реки Курунг-Юрях, Улахан-Ботуобуя, Успун, Телгеспит), а добыча подземных вод возможна исключительно в пределах развития радиационно-тепловых таликов на водоразделах, для которых характерны гипсометрические отметки рельефа от +420 до +494 м. Перепад высот с областью эрозионного вреза достигает 80–100 м [1].

Талики в границах рассматриваемого участка были выявлены благодаря комплексным геолого-геофизическим изысканиям источников подземного водоснабжения, проведенным в период с 2015 по 2022 г. [2], включавшим площадную электроразведку методом мЗСБ с

охватом площади не менее 800 км², бурение разведочно-эксплуатационных скважин с последующей увязкой на геоэлектрический разрез площади и дальнейшим комплексированием условий выявления таликов на базе следующих факторов:

- 1) данных по удельному электрическому сопротивлению (УЭС) пород;
- 2) положения относительно водораздельных пространств;
- 3) положения тел интрузивного магматизма;
- 4) данных по положению кровли и подошвы целевого объекта;
- 5) экспозиции склона.

На основе перечисленного комплекса признаков была составлена карта вероятного наличия таликов [2]. В зонах с большим количеством положительных факторов отмечается высокая подтверждаемость наличия водонасыщенных отложений по результатам бурения [1].

Помимо наличия плановых границ с переходом к ММП изучаемый водоносный горизонт осложнен зонами неравномерной трещиноватости карбонатной части коллектора внутри таликов, что обуславливает присутствие дополнительных границ фильтрации в плане, а также резкую смену фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС).

К осложняющим условиям эксплуатации водозабора следует также отнести высокое содержание сероводорода в подземных водах нижезалегающего водоносного горизонта в объеме карбонатных отложений метегерской (литвинцевской) свиты. Средняя концентрация этого газа составила 73 мг/дм³. В связи с его негативным влиянием на условия разработки основного полезного ископаемого недропользователем принято решение об исключении добычи подземных вод из отложений указанного горизонта, а конструкции скважин на вышележащий объект должны исключать возможность вскрытия или техногенного перетока сероводородсодержащих подземных вод в целевой объект.

В ходе государственной геологической экспертизы отчетных материалов с оценкой запасов подземных вод гидрогеологические условия Среднеботуобинского месторождения отнесены к третьей группе (очень сложные).

Для учета всей совокупности факторов, влияющих на обеспеченность запасов подземных вод и их качество в процессе эксплуатации водозабора, авторами статьи была разработана конечно-разностная геофильтрационная модель, а также модель геомиграции в численном симуляторе Visual ModFlow Flex. На рисунке представлена пространственная схематизация модели в составе четырех расчетных слоев. Первым слоем является укугутская свита, вторым – бордонская, третий слой представляет собой интервал плотных водоупорных отложений в кровле метегерской свиты, препятствующих восходящей разгрузке сероводородсодержащих подземных вод, четвертый слой – метегерская свита [3].

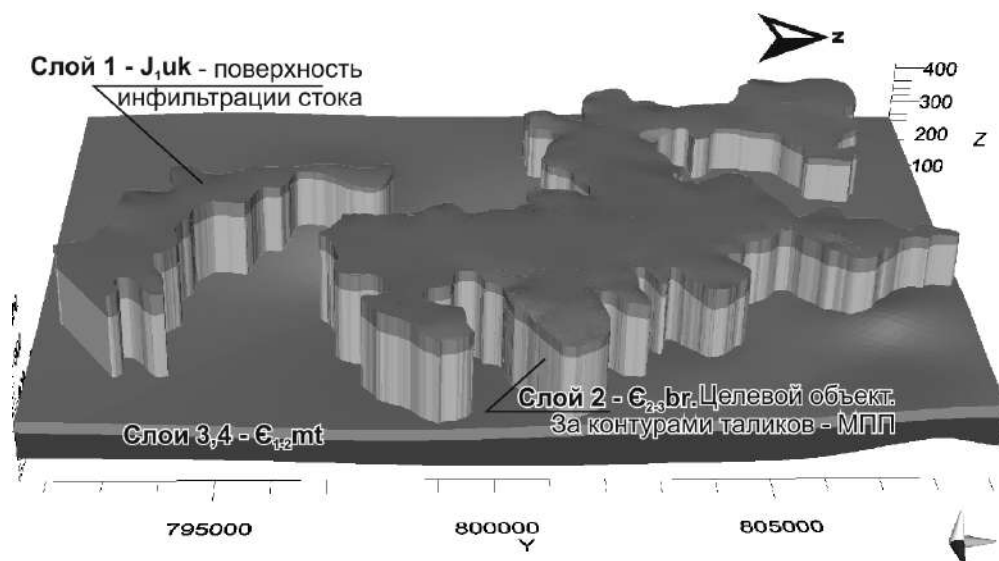


Схема блокировки численной модели в плане.

Зоны распространения таликов четко оконтурены по результатам площадных электроразведочных работ и загружены полигональными объектами в область моделирования для 1 и 2-го расчетных слоев. Слои № 3 и 4 заданы в границах всей области моделирования. Структурные профили и толщина расчетных слоев заданы на основании геологических отбивок по данным паспортов разведочно-эксплуатационных скважин на подземные воды и разведочных скважин на углеводородное сырье.

Область распространения ММП задана резко контрастным снижением ФЕС до около-нулевых значений: коэффициент фильтрации задан значением $8.64 \cdot 10^{-5}$ м/сут как в продольном так и в поперечном направлении, упругая водоотдача задана значением $1 \cdot 10^{-7}$ м⁻¹, гравитационная водоотдача – $1 \cdot 10^{-5}$ д.е. Коэффициент фильтрации, представленный отложениями целевого объекта, задавался через отношение коэффициента водопроницаемости к общей мощности целевого объекта. Коэффициенты водопроницаемости слоев № 1 и 2 (от 8 до 470 м²/сут) были получены по данным ОФР по всем скважинам. Соответствующие им значения коэффициентов фильтрации через отношение к общей мощности составляют от 0.1 до 3.0 м/сут. Площадная неоднородность параметра загружена в модель сеточной картой, построенной методом обратных расстояний. Инфильтрационное питание первого слоя (укугутская свита, терригенные отложения) было задано равным 60 мм/год, что составляет 20 % от среднегогодового количества атмосферных осадков по данным метеостанции города Мирный.

Поскольку объект является замкнутой гидрогеологической структурой и имеет инфильтрационное питание, в естественных условиях должна наблюдаться разгрузка накопленного объема инфильтрационных вод. В ходе гидрогеологической съемки, проводившейся в 2015–2016 гг., было установлено наличие наледей и полыньи на территории водораздельных пространств, а также в их бортах [1].

Для воспроизведения в модели естественной разгрузки подземных вод первоначально была создана система имитирующих разгрузку дрена (ячейки с граничным условием «Дрена»), которые симулировали отвод воды из целевого объекта. Дрены устанавливались по контуру таликов и активировались по условию достижения заданного уровня подземных вод. Однако в процессе апробации модели экспертами ФБУ «ГКЗ» было указано на то, что такой подход искажает физичность воспроизводимых процессов и нарушает баланс приходной и расходной части, поэтому граничное условие «Дрены» было заменено на задание речной сети, воспроизводящей условия постоянных и временных водотоков. Описанный подход является более физичным и естественным образом регулирует питание и разгрузку целевого объекта в естественных и нарушенных техногенным водоотбором условиях.

Конструкции водозаборных скважин задавались в соответствии с их паспортными данными. Начальные напоры целевого объекта в природных условиях задавались по данным паспортных опробований перед началом опытно-фильтрационных работ. При загрузке начальных напоров было установлено, что их перепад по близко расположенным скважинам составляет до 20 м, что указывает на отсутствие гидравлического взаимодействия между скважинами, поэтому по границам данных перепадов внутри таликовых зон были заданы дополнительные границы фильтрации по аналогии с ММП.

Параметр гидродинамической дисперсии при распространении сероводорода был задан равным 10 м, как наиболее неблагоприятный для существующих условий. Начальная концентрация сероводорода в отложениях метегерской свиты была задана 73 мг/дм³, как среднее по данным определения на начальных этапах изучения участка.

Дебитный режим водозаборных скважин с начала разработки месторождения загружался в модель в среднемесячных значениях для каждой выработки для максимально точного учета депрессионного воздействия на пласт. Замеры статического уровня загружались по фактическим объемам данных. Калибровка параметров модели выполнена через решение обратных задач с воспроизведением истории водоотбора и наблюдаемого положения статического уровня с последующим их сопоставлением с расчетными

значениями до достижения требуемого уровня сходимости. В процессе верификации модели калибровались значения емкостных параметров в соответствии с таблицей, а также параметров речной сети. Для существующих сложных условий рассматриваемого участка допустимый порог сходимости расчетных и фактических данных был принят равным 10 %. По результатам адаптации модели целевой порог сходимости был достигнут с величиной отклонений между фактическими и модельными уровнями $\pm 8.15\%$.

Величины емкостных параметров по результатам адаптации модели

Номер слоя	Зона модели	Индекс ВГ	Гравитационная водоотдача, д.е	Упругая водоотдача, м^{-1}	Эффективная пористость, д.е.	Общая пористость, д.е
1, 2, 3	ММП	$J_{1uk},$ $\epsilon_{2-3br},$ ϵ_{1-2mt} (водоупор)	0.00001	0.0000001	0.01	0.3
1, 2	Талик основной	$J_{1uk},$ ϵ_{2-3br}	0.003	От 0.001 до 0.07	0.1	0.4
1	Талик южный	J_{1uk}	0.1	0.003	0.1	0.4
2	Талик южный	ϵ_{2-3br}	0.02	0.013	0.1	0.4
3	Талики	ϵ_{1-2mt} (водоупор)	0.0001	0.0001	0.02	0.5
4	Весь слой	ϵ_{1-2mt}	0.01	0.0001	0.1	0.4

Таким образом, в качестве выводов можно выделить следующие основные особенности численного моделирования замкнутых гидрогеологических структур:

1. Для моделирования замкнутых структур необходима достоверная информация о границах распространения изучаемого объекта. Области с отсутствием коллектора необходимо задавать резко контрастными снижением ФЕС на 7–8 порядков по опыту разработки представленной модели.

2. Приход и расход гидрогеологической структуры должен быть основан на объективных данных: за счет чего формируются емкостные запасы объекта, а какие ресурсы являются привлекаемыми и как осуществляется разгрузка горизонта в естественных условиях.

3. Для симуляции естественного дренирования объекта рекомендуется использовать граничное условие «река», а не «дрена».

4. В сложно построенных коллекторах определение коэффициента фильтрации следует вычислять через отношение коэффициента водопроницаемости к общей мощности объекта, а не к эффективной.

5. Гидродинамические барьеры внутри таликовых зон можно также задавать путем резкого контрастного снижения фильтрационных свойств по линиям шириной в одну ячейку конечно-разностной сетки. Это позволяет исключить гидравлическую связь внутри расчетного слоя.

6. При решении обратной задачи в основном осуществляется корректировка емкостных свойств слоев модели, поскольку их определение возможно исключительно за счет изучения кернового материала, что в подавляющем большинстве случаев отсутствует.

Список литературы

1. Дергачев В.Д. Технический отчет по поисково-оценочным работам на подземные воды на Среднеботуобинском НГКМ, выполненным в 2015–2016 гг. Иркутск: ООО «АГЭ», 2017. 151 с.
2. Ильин А.И. Разведка (доразведка) Среднеботуобинского месторождения технических подземных вод для целей поддержания пластового давления в границах Центрального нефтяного блока и Курунгского лицензионного участка. Электроразведочные работы методом мЗСБ в северной части Центрального блока Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения. Иркутск: ООО «СИГМА-ГЕО», 2021. 173 с.
3. Савельев Е.А. и др. Разведка (доразведка) Среднеботуобинского месторождения технических подземных вод для целей поддержания пластового давления в границах Центрального нефтяного блока и Курунгского лицензионного участка. Тюмень: ООО «ТННЦ», 2024. 182 с.

РЕАКЦИЯ ГЕОФЛЮИДНЫХ СИСТЕМ НА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ $M_w = 8.8$ НА КАМЧАТКЕ (29.07.2025 г.)

Кирюхин А.В.¹, Соломатин А.В.¹, Поляков А.Ю.¹, Лемзиков М.В.¹, Бурнайкин Д.Н.²,
Петрченко В.П.³, Копылова Г.Н.⁴, Рябинин Г.В.⁴, Демянчук Ю.В.^{1,4}, Усачева О.О.¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

²АО «Тепло Земли», Петропавловск-Камчатский

³АО «Быстринская горная компания», Петропавловск-Камчатский

⁴Камчатский филиал ФИЦ ЕГС ГС РАН, Петропавловск-Камчатский,

AVKiryukhin2@mail.ru

Аннотация. Землетрясение $M_w = 8.8$ 29.07.2025 г. сопровождалось откликом геофлюидных систем: активизацией сейсмогенных разломов, значительными косейсмическими понижениями (первые метры) уровней воды и давления в геотермальных скважинах, снижением расходов скважин или полным прекращением их разгрузки (Вилучинское, Паратунское и Кеткинское геотермальные месторождения), пропусками извержений гейзера Большой (Долина Гейзеров), возникновением нового гейзера-скважины (Кумроч), началом извержений вулканов (Крашенинникова – впервые за ~600 лет, Ключевской) и их активизацией (Карымский, Мутновский, Камбальный). Указанные явления отражают геомеханические условия растяжения континентальной земной коры на Камчатке, согласуются с механизмом землетрясения $M_w = 8.8$, спутниковыми геодезическими данными GNSS и InSAR.

Ключевые слова: землетрясение, геофлюидные системы, магма, вода, газ, вулкан, гейзер, Камчатка, 2025 г.

Abstract. The $M_w = 8.8$ earthquake of 29.07.2025 was accompanied by geofluid systems response: regional seismogenic faults activation, significant post-seismic decreases (the first meters) in water levels in geothermal wells, reduction of well discharge or its complete cessation (Vilyuchinsky, Paratunsky and Ketkinsky geothermal fields), omissions of eruptions of the Bolshoy geyser (Valley of Geysers), the emergence of a new geyser-well (Kumroch), the beginning of volcanic eruptions (Krashenninnikov volcano for the first time in ~600 years, and Klyuchevskoy volcano) and volcanoes activity increase (Karymsky, Mutnovsky, Kambalny). These phenomena are consistent with the focal mechanism of The $M_w = 8.8$ earthquake's and satellite geodetic data from GNSS and InSAR.

Keywords: Earthquake, geofluid systems, water, gas, volcano, magma, Kamchatka, 2025

В данной работе рассматривается реакция геофлюидных систем (региональных сейсмогенных разломов, гидротермальных и гидрогеологических резервуаров, систем магматического питания вулканов) на землетрясение $M_w = 8.8$, произошедшее на Камчатке. Система региональных сейсмогенных разломов идентифицируется в форме плоскоориентированных кластеров гипоцентров региональных землетрясений [1, 2]. Магматическая активность вулканов, проявляющаяся в виде магматического фракинга [9] с образованием даек и силлов, идентифицируется в форме плоскоориентированных микроземлетрясений гипоцентров микроземлетрясений (MEQ).

Мониторинг давления в гидротермальных и гидрогеологических резервуарах проводится в рамках гидрогеологических наблюдений компаниями, эксплуатирующими геотермальные месторождения (ОАО "Тепло Земли", ПАО "Камчатскэнерго"). Наблюдения за активностью гейзеров (интервалом между извержениями) проводятся с помощью автономных регистраторов температуры [11], на скважинах Петропавловского геодинамического полигона также проводятся высокоточные уровнемерные наблюдения [13, 14].

При анализе геомеханического состояния геофлюидных систем используется предположение о фрикционном равновесии сейсмогенных разломов [18], опыт применения принципов гидравлического разрыва для описания формирования дайковых полей [6, 7] и гидрогеодинамические показатели сейсмической активности [3, 4].

В исследовании использовались сейсмологические данные по Камчатке за период 01.01.1980 – 10.01.2026 г.: из регионального каталога землетрясений КФ ФИЦ ЭГС РАН и глобального каталога NEIC USGS. Первый из этих наборов данных включает 16 249 событий с классом K_s не менее 9.5, а второй – 6584 события с магнитудой M не менее 4.2.

Расчеты с применением Frac-Digger метода [1] на основе этих параметров с использованием регионального каталога землетрясений позволили выявить 133 региональных сейсмогенных разлома, из них 87 показали признаки активизации после землетрясения

$M_w = 8.8$. Из 87 разломов 24 показали признаки наибольшей афтершоковой активности – все они относятся к области очага указанного мегаземлетрясения. Сейсмогенные разломы с наибольшей афтершоковой активностью характеризуются явным преобладанием азимутов падения $285\text{--}330$ и $120\text{--}135^\circ$ (простираение на СВ, ССВ) и углов падения $20\text{--}30$ и $40\text{--}50^\circ$ с глубиной очагов менее 70 км. Сравнение общего списка сейсмогенных разломов и сейсмогенных разломов с наибольшей афтершоковой активностью показывает, что направление максимального горизонтального напряжения SH_{max} после землетрясения $M_w = 8.8$ повернулось против часовой стрелки на 10° .

На Кеткинском геотермальном месторождении [10] на скважине К6 отмечено падение дебита через 30 мин после окончания землетрясения $M_w = 8.8$, а на скважине К01 падение дебита с 1.22 л/с при температуре 64.0°C до 1.06 л/с при температуре до 62.0°C через 7.5 ч после землетрясения. Температура в этой скважине постепенно продолжала снижаться и к концу года составила 55.9°C . Рабочее давление на устье скважины К01 снизилось после землетрясения с 1.2 до 0.8 бар. К декабрю 2025 г. оно восстановилось до 1.1 бар. На скважине ГК-1 наблюдалось резкое снижение дебита воды (с 0.092 до 0.068 л/с) и минерализации (с 9.9 до 9.2 г/дм^3).

Снижение расхода скважин зафиксировано на Паратунском геотермальном месторождении: на Среднем участке скважины ТЗ, на Северном участке скважины К63 и на скважине К8 Южнобережного участка было обнаружено прекращение самоизлива. На скважине R27 (Вилючинское геотермальное месторождение) после землетрясения $M_w = 8.8$ прекратился самоизлив и уровень упал на 4.5 м.

В связи с землетрясением $M_w = 8.8$, согласно прецизионным наблюдениям КФ ГС РАН, в пьезометрических скважинах были зарегистрированы различные сейсмогидрогеодинамические эффекты: косейсмические падения уровня воды в течение примерно полутора часов после землетрясения с амплитудой -4.4 м (ЮЗ-5) и -5.8 м (1303), что соответствует величине объемной деформации расширения водоносных пород $2.7 \cdot 10^{-6}$ [13, 14]; медленное восстановление уровня воды/давления депрессий до их фоновых сезонных значений. В скважине Е-1 впервые в течение трех недель после землетрясения $M_w = 8.8$ было зарегистрировано сопутствующее сейсмике снижение уровня воды с амплитудой около 30 см. С конца сентября наблюдается постепенное восстановление уровня воды с амплитудой до 10 см. В скважине М-1 отмечалось падение давления на 0.1 бар в течение полутора часов, увеличение электропроводности и температуры (на 0.5°C) подземных вод.

С 2008 г. в Долине Гейзеров и кальдере Узон проводится непрерывный мониторинг интервала между извержениями (interval between eruptions, IBE) гейзеров Большой, Великан, Грот и Шаман (Узон) [11]. Дискретных изменений в IBE ни одного из гейзеров не наблюдалось после землетрясения $M_8.8$. Тем не менее отмечаются следующие аномальные особенности: в период с мая по август 2025 г. гейзер Большой «пропустил», по меньшей мере, 12 извержений, которые обычно происходят каждые 80 мин; гейзер Грот прекратил свою эруптивную активность за 3–4 месяца до землетрясения $M_w = 8.8$.

В районе золоторудного месторождения Кумроч в сентябре 2025 г. была обнаружена скважина, работающая в гейзерном режиме (1 извержение в секунду, 40°C), хотя ранее из нее вытекало небольшое количество теплой воды.

В 2025 г. сейсмическая активность на Мутновском вулкане регистрировалась восемью сейсмическими станциями КФ ФИЦ ЕГС РАН (MTV, GRL, ASA, RUS, PET, DVGB, KLDG, VKN). После землетрясения $M_w = 8.8$ на Мутновском вулкане была зафиксирована повышенная сейсмическая активность, мониторинг содержания газа (CO_2) на конденсаторе

турбины Мутновской геотермальной электростанции (проводится с 2019 г. [8]) показал колебания PCO_2 с амплитудой ± 750 Па в течение недели перед событием.

Сейсмическая и вулканическая активность вулкана Ключевской усилилась после землетрясения $M_w = 8.8$. С 08.08.2025 г. началось интенсивное извержение раскаленных бомб и фонтанирование лавы, при этом на склоны были выброшены большие объемы пирокластического материала. Наибольшая магматическая активность зафиксирована в малоглубинной магматической системе вулкана Ключевской на отметках около +1 км (метод выявления магматической активности вулкана изложен в работе [12]).

Вулкан Крашенинникова, не проявлявший активности в течение последних 600 лет, после землетрясения $M_w = 8.8$ начал извержение 03.08.2025 г. Согласно спутниковым данным KVERT, взрывы выбросили пепел на высоту до 8.0–8.5 км над уровнем моря. Лавовые потоки вытекающие из вершинного кратера, зафиксированы 08.08.2025 г. (Маркевич Г.Н., личное сообщение).

Активность вулкана Карымский после землетрясения $M_w = 8.8$ возобновилась, зафиксирован выброс пепла на высоту до 2 км (согласно KVERT от 14.08.2025). Реакция геофлюидных систем (вулканов и гейзеров) на сильнейшие землетрясения не случайна, как показано в обзоре [15], 0.4 % извержений вулканов происходят через несколько дней после отдаленных сильнейших землетрясений, что значительно превышает среднюю эруптивную активность вулканов. Авторы предполагают, что кипение (образование газовых пузырьков) в магматических системах может быть триггером для извержений, а зарождение газовых пузырьков вызвано прохождением сейсмических волн. В случае землетрясения $M_w = 8.8$ причиной вскипания магматических систем также могло быть региональное растяжение верхней части земной коры, зафиксированное гидрогеологическими и спутниковыми геодезическими наблюдениями [16]. Влияние регионального растяжения на магматические системы вулканов также приводит к увеличению объема последних и снижению давления жидкой магматической фазы. Когда давление падает ниже давления насыщения растворенных газов, начинается процесс кипения с повышенной парогазовой активностью и возможностью последующих газлифтных извержений. Это особенно важно для таких гигантских вулканов, как Ключевской (4850 м), где магма может достигать вершины, используя только газлифт [5].

В итоге можно сформулировать следующие выводы:

1. Сильнейшее землетрясение с магнитудой 8.8 на Камчатке сопровождалось региональным растяжением, последующими значительными деформациями водоносных пород в верхней части земной коры с объемными деформациями до $n \cdot 10^{-6}$ и различными реакциями геофлюидных систем.

2. Некоторые гидротермальные резервуары снизили давление (до 0.45 бар) и уменьшили дебит скважин (из-за увеличения трещинно-порового пространства водоносных пород).

3. У гейзера Большой наблюдались перерывы в извержениях, а гейзер Грот прекратил извергаться (вероятно, из-за разгерметизации и прекращения газлифта притоком холодной воды). В Кумроче появилась гейзер-скважина (предположительно резервуар CO_2 закипел из-за увеличения порового пространства).

4. Вулканы Ключевской и Крашенинникова начали извергаться, а вулканы Карымский, Мутновский и Камбальный повысили активность.

5. Наиболее активными были сейсмогенные разломы с ориентацией север-северо-восток, близкой к ориентации нодальной плоскости NP1 механизма землетрясения $M_w = 8.8$ (согласно NEIC и [17]) и векторам смещения по данным GNSS и INSAR [16].

Исследование проводилось в рамках проекта FWME-2024-0007 в Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Авторы выражают благодарность О.В. Бергаль-Кувикас за обсуждение результатов, В.В. Шевцову за проведение наблюдений на скважине R27, А.А. Любину, А.П. Корчагиной, Г.Н. Маркевичу и Е.В. Черных за техническую поддержку.

Данные, использованные в работе, были получены с помощью крупномасштабной исследовательской установки «Сейсмическая инфразвуковая решетка для мониторинга арктической криолитозоны и непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

Список литературы

1. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем. СПб.: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.
2. Кирюхин А.В., Соломатин А.В. Геомеханические условия сейсмической, вулканической и гидротермальной активности // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа», 1–7 сентября 2025 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2025. С. 13–16.
3. Киссин И.Г. Флюиды в земной коре. Геофизические и тектонические аспекты / Под ред. Ю.Г. Леонова. М.: Наука, 2009. 328 с.
4. Björnsson G., Flovenz O., Saemundsson K. and Einarsson E. Pressure changes in icelandic geothermal reservoirs associated with two large earthquakes in june 2000 // Proceedings, Twenty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 29–31, 2001 SGP-TR-168.
5. Eichelberger John C. How Much Magma Reservoir Pressure is Required to Build a Mountain? // Proceedings of All-Russian Scientific Conference «Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil and Gas Geology» Petropavlovsk-Kamchatsky, 2023. P. 65–70.
6. Gudmundsson, A. How local stresses control magma-chamber ruptures, dyke injections, and eruptions in composite volcanoes // Earth-Sci. Reviews. 2006. 79. 1–31.
7. Gudmundsson A. The propagation paths of fluid-driven fractures in layered and faulted rocks // Geological Magazine. 2022. 159. 1978–2001.
8. Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Usacheva O.O., Kiryukhin P.A. Thermal-permeability structure and recharge conditions of the Mutnovsky high temperature geothermal field (Kamchatka, Russia) // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2018. 356C. P. 36–55.
9. Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Voronin P.O., Zhuravlev N.B., Usacheva O.O., Solomatin A.V., Kiryukhin P.A. Magma Fracking and Production Reservoirs Beneath and Adjacent to Mutnovsky Volcano Based on Seismic Data and Hydrothermal Activity // Geothermics. 2022. 105. 102474.
10. Kiryukhin A.V., Nazhalova I.N., Zhuravlev N.B. Hot water-methane reservoirs at northwest foothills of Koryaksky volcano, Kamchatka // Geothermics. 2022. Vol. 106. 102552.
11. Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Zhuravlev N.B., Tsuchiya N., Rychkova T.V., Usacheva O.O., Dubrovskaya I.K. Dynamics of natural discharge of the hydrothermal system and geyser eruption regime in the Valley of Geysers, Kamchatka // Applied Geochemistry. 2022. Vol. 136. P. 105166.
12. Kiryukhin A.V., Bergal-Kuvikas O.V., Lemzikov M.V. Magmatic activity of Klyuchevskoy volcano triggering eruptions of Bezymianny volcano based on seismological and petrological data // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2023. Vol. 442. 107892.
13. Kopylova G.N., Steblov G.M., Boldina S.V., Sdel'nikova I.A. The Possibility of Estimating the Coseismic Deformation from Water Level Observations in Wells // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2010. Vol. 46, No. 1. P. 47–56.
14. Kopylova G., Boldina S. Seismo-Hydrogeodynamic Effects in Groundwater Pressure Changes: A Case Study of the YuZ-5 Well on the Kamchatka Peninsula // Water. 2023. Vol. 15. P. 2174.
15. Manga M., Brodsky E. Seismic Triggering of Eruptions in the Far Field: Volcanoes and Geysers // The Annual Review of Earth and Planetary Science. 2006. 34:263–91 doi: 10.1146/annurev.earth.34.031405.125125.
16. Mikhailov V.O., Konvisar A.M., Smirnov V.B., Timoshkina E.P., Titkov N.N., Khairtdinov S.A., and Chebrov D.V. The Rupture Surface Model of the 29.07.2025 Mw 8.8 Kamchatka Earthquake Based on Satellite Geodesy and Interferometry Data // Doklady Earth Sciences. 2025. Vol. 525:35.
17. Xu D. Wang W., Ren Z., Preliminary slip distribution of the 29.07.2025 MW 8.8 Kamchatka, Russia earthquake, Earthquake Research Advances, <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2025.100427>.
18. Zoback Mark D. Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press, 2010. 449 p.

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ КАМЧАТСКОГО МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 29 ИЮЛЯ 2025 Г., $M_w = 8.8$ (ПО ДАННЫМ ПРЕЦИЗИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В СКВАЖИНАХ)

Копылова Г.Н., Болдина С.В.

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Петропавловск-Камчатский, gala@emsd.ru

Аннотация. В 2025 г. на Камчатке произошла сейсмическая активизация, включающая мега-землетрясение 29 июля с магнитудой 8.8, его фор- и афтершоки. По данным прецизионных измерений давления, температуры и электропроводности подземной воды в глубоких скважинах, расположенных в ближней зоне очага мегаземлетрясения, зарегистрированы различные сейсмогидрогеологические эффекты вибрационного воздействия сейсмических волн, изменения статического напряженного состояния водовмещающих пород, релаксационные и другие гидрогеодинамические процессы в системах скважина – водовмещающая порода.

Ключевые слова: скважина, землетрясение, давление подземной воды

Abstract. In 2025, seismic activity occurred in Kamchatka, including a mega-earthquake with a magnitude of 8.8, its fore- and aftershocks. Based on precision measurements of pressure, temperature and electrical conductivity of groundwater in deep wells located in the near zone of the megaeearthquake source, various seismichydrogeological effects of the vibrational impact of seismic waves, changes in the static stress state of water-bearing rocks, relaxation and other hydrogeodynamic processes in well-water-bearing rock systems were recorded.

Keywords: well, earthquake, groundwater pressure

КФ ФИЦ ЕГС РАН проводит многолетние прецизионные наблюдения за вариациями давления и температуры подземной воды в четырех скважинах глубиной 600–800 м. В двух скважинах также измеряется электропроводность воды. Данные о строении скважин и используемом оборудовании приводятся в статье [1].

Цель проводимых работ – детальное изучение гидрогеологических эффектов при сильных землетрясениях, в первую очередь изменений давления подземных вод (или сейсмогидрогеодинамических эффектов – СГГЭ). Результаты предыдущих исследований СГГЭ, зарегистрированных в пьезометрических и самоизливающихся скважинах, представлены в публикациях [2–4, 6–8]. В указанных работах дано систематическое описание СГГЭ при землетрясениях 1997–2024 гг.; представлена типизация СГГЭ, основанная на экспериментальных данных прецизионных наблюдений за изменениями параметров подземных вод и современных представлениях о процессах в очагах землетрясений и их откликах в системах скважина – водовмещающая порода. В обновленной типизации СГГЭ были уточнены особенности изменений давления подземной воды в области высокочастотных вариаций при регистрации давления с частотой 1 Гц. Прецизионными наблюдениями за вариациями уровня воды (1996–2020 гг.: чувствительность измерений 0.1 см водяного столба, периодичность 5–10 мин) и давления воды (2021 г. – настоящее время: чувствительность 0.1 гПа, частота 1 Гц) были надежно обоснованы два типа высокочастотных вариаций давления подземной воды, соответствующих динамическому воздействию сейсмических волн [3] и быстрой фазе статического изменения напряженного состояния водовмещающих пород при образовании разрывов в очагах местных землетрясений [9].

Благоприятное сочетание сети скважин, оборудованных современными системами наблюдений, и активизации сейсмичности вблизи п-ова Камчатка в июле – ноябре 2025 г. предоставило уникальную возможность детально проследить гидрогеодинамические эффекты в скальных водовмещающих породах в ближней зоне очагов землетрясений, включая Камчатское мегаземлетрясение 29 июля с $M_w = 8.8$ (MEq).

Для характеристики расположения наблюдательных скважин по отношению к очагам землетрясений использовалась величина относительного расстояния d_h/L , где d_h – гипоцентральный расстояние до скважины, км; L – размер очага землетрясения,

определяемый по формуле $\lg L = 0.43M_w - 1.27$ [5], где M_w – моментная магнитуа по каталогу NEIS USGS.

Основное внимание в докладе уделяется косейсмическим эффектам быстрой фазы статического изменения напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород [9] и возможности их использования для оценки изменения объемной деформации водовмещающих пород.

В скв. ЮЗ-5 были зарегистрированы 16 косейсмических скачков давления с амплитудой $\Delta p_{cos} = 0.2 - 440$ гПа (таблица). Оценка величин Δp_{cos} проводилась по записям давления воды с частотой 1 Гц как разность между средними значениями при вступлении Р- и S-волн [8]. В 15 случаях происходило понижение давления, соответствующее объемному расширению водовмещающих пород.

Данные о землетрясениях, которые сопровождались косейсмическими изменениями давления воды в скважине ЮЗ-5 с амплитудой $\Delta p_{cos} \geq 0.2$ гПа (июль – ноябрь 2025 г.)

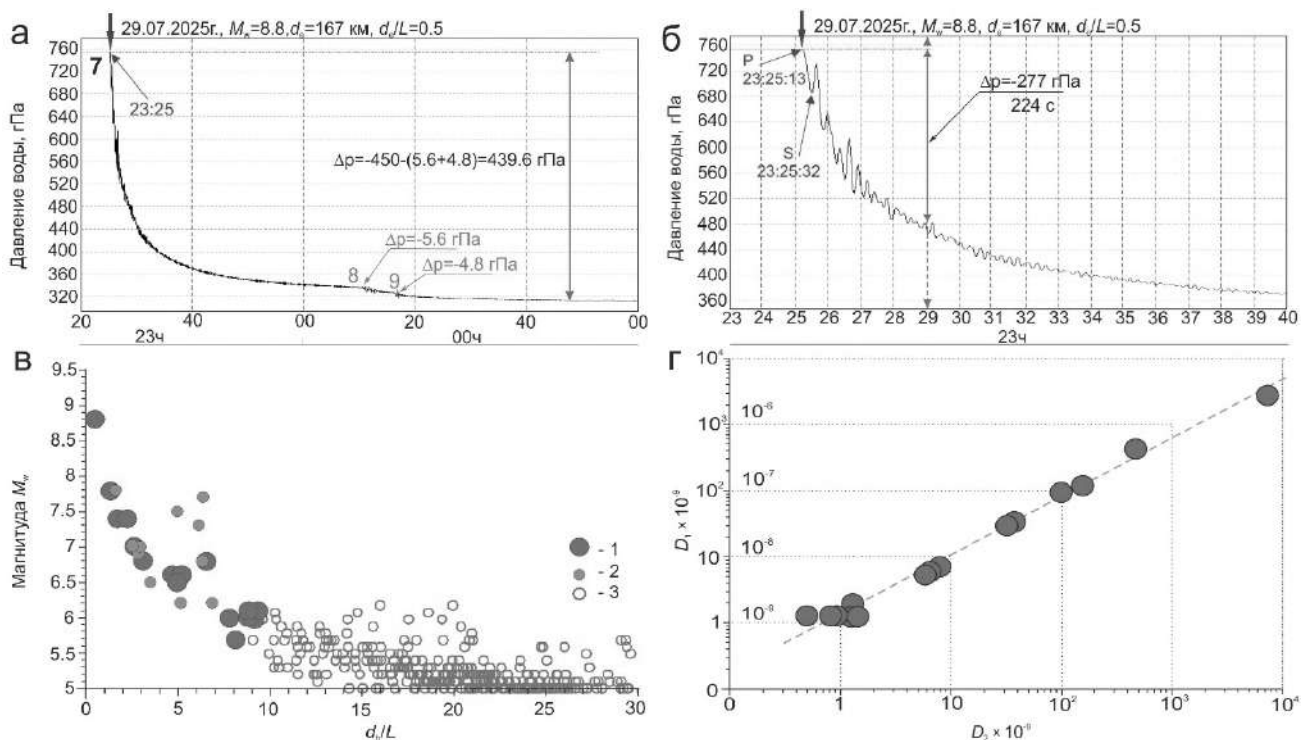
№	Гипоцентр					M_w	d_h , км	L , км	d_h/L	I	Δp_{cos} , гПа	Объемная косейсмическая деформация, 10^{-9}	
	Дата дд.мм	Время чч:мин	Координаты, градусы		H , км							по изменениям давления воды, D_1	D_2
			N	E									
1	20.07	06:28	52.70	160.98	5	6.6	179	37	4.8	5	-1.1	7.0	7.4
2	20.07	06:49	52.64	160.95	50	7.4	186	82	2.3	5-6	-(15.3-34)	97-215	103
3	20.07	07:08	52.60	161.08	5	6.6	189	37	5.1	4	-1.0	6.3	6.4
4	20.07	07:23	52.81	160.87	13	6.5	169	34	5.0	3	-0.9	5.7	6.3
5	22.07	01:59	52.36	161.00	39	6.1	198	22	8.8	3	+0.2	-1.3	-1.2
6	24.07	22:37	52.74	161.44	44	6.1	209	22	9.3	2	-0.2	1.3	0.9
7	29.07	23:25	52.36	160.53	44	8.8	173	327	0.5	6-7	-(277-440)	1753-2800	7500
8	30.07	00:10	52.19	159.8	37	7.0	147	55	2.7	4	-5.6	35	35
9	30.07	00:16	52.19	159.54	45	6.8	139	45	3.1	4	-4.8	30	24
10	03.08	05:38	50.54	157.99	49	6.8	295	45	6.5	3	-0.2	1.3	1.0
11	15.08	10:12	52.80	159.97	53	5.7	123	15	8.1	4-5	-0.2	1.3	0.3
12	13.09	2:38	53.03	160.48	46	7.4	145	82	1.8	5	-(9-18.7)	57-118	155
13	15.09	16:35	52.70	160.68	15	6.0	161	20	7.8	2	-0.2	1.3	1.4
14	18.09	18:58	53.12	160.78	48	7.8	164	121	1.4	5-6	-(69-126)	440-800	480
15	03.11	07:10	52.12	160.41	20	6.0	178	20	8.7	3	-0.2	1.3	1.1
16	04.11	23:29	52.06	160.47	20	6.0	185	20	9.1	3	-0.3	1.9	1.0

Примечание. d_h – гипоцентральное расстояние до скважины, км; L – размер очага землетрясения по [5]; d_h/L – относительное расстояние от очага землетрясения до скважины; I – макросейсмическая интенсивность в баллах шкалы MSK-64 в районе г. Петропавловска-Камчатского (по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН); Δp_{cos} – амплитуда косейсмического изменения давления воды: «-» соответствует понижению давления воды, «+» – повышению; $D_1 = -\Delta p_{cos}/0.158$, где 0.158 гПа/ 10^{-9} – деформометрическая (приливная) чувствительность вариаций давления воды [7, 8]; D_2 – расчетная величина объемной деформации в районе скважины по модели протяженного дислокационного источника в однородном упругом полупространстве [10] с параметрами, соответствующими механизму очага по каталогу GCMT.

В таблице для четырех наиболее сильных землетрясений с $M_w = 7.4-8.8$ (выделены жирным шрифтом) проводятся также оценки максимальных косейсмических амплитуд понижения Δp (рисунок, а). В таких случаях при совместном воздействии механизмов

динамического и статического изменения напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород, примыкающих к открытому стволу скважины, происходит изменение в состоянии системы скважина – водовмещающая порода. При проявлениях обычных косейсмических скачков давления состояние системы характеризуется чисто недренированными (“confined”) условиями, когда течением воды можно пренебречь [7, 8]. При землетрясениях с $M=7.4-8.8$ на относительных расстояниях $d_h/L=0.5-2.3$ на проявление косейсмического скачка давления определенное влияние оказывает отток воды из скважины в удаленные от ствола скважины зоны водовмещающих пород (частично дренированные условия).

Верификация величин изменения объемной деформации водовмещающих пород D_1 осуществлялась с помощью их сравнения с расчетными величинами объемной деформации в районе скважины на глубине 500 м (средняя глубина открытой части ствола скважины) D_2 , полученной по модели протяженного дислокационного источника [10] с параметрами механизмов очагов по каталогу GlobalCMT (рисунок, з).



Вариации давления воды в скважине ЮЗ-5 при мегаземлетрясении 29 июля (№ 7 в таблице) с оценками максимальной амплитуды Δp_{cos} на интервале времени 1.5 ч после вступления сейсмических волн с учетом косейсмических скачков давления при афтершоках № 8 и 9 (а) и минимальной амплитуды понижения давления Δp_{cos} во время прохождения объемных сейсмических волн в течение 224 с (по данным КФ ФИЦ ГС РАН) (б); распределение землетрясений в зависимости от величины магнитуды M_w и относительного расстояния d_h/L , при которых косейсмические изменения давления воды проявлялись (условные обозначения 1 и 2) и не проявлялись (3): 1 – землетрясения в июле – ноябре 2025 г. (таблица), 2 – коровые землетрясения 1997 – 2024 гг. [2, 8], 3 – землетрясения с $M_w \geq 5$ в июле – ноябре 2025 г. (в); соотношение величин объемной деформации по данным о косейсмических изменениях давления воды в скв. ЮЗ-5 (D_1) и по модели протяженного дислокационного источника [10] с параметрами очагов землетрясений по Global CMT (D_2) (з).

На примере скв. ЮЗ-5 показано, что проявления косейсмических скачков давления подземной воды, соответствующих быстрой фазе статического изменения напряженного состояния водовмещающих пород, определяются параметрами землетрясений – соотношением их магнитуды и относительного расстояния до скважины (рисунок, в). Такие

эффекты характерны исключительно для ближней и средней зоны очагов землетрясений ($d_h/L \leq 9$). При наиболее сильных землетрясениях с $M_w=7.4-8.8$, произошедших на относительных расстояниях от скважины $d_h/L=0.5-2.3$, амплитуда понижения давления воды $\Delta p_{\cos}$ составляла $-19...-440$ гПа (таблица), что соответствовало понижению уровня воды в стволе скважины $-19.4...-449$ см водяного столба.

Полученные оценки объемной косейсмической деформации D_1 в диапазоне от $\text{ед.} \times 10^{-9}$ до $\text{ед.} \times 10^{-6}$ по данным измерений давления воды в скв. ЮЗ-5 с частотой 1 Гц, находятся в соответствии с расчетными величинами D_2 в пределах одного порядка (таблица, рисунок, з). Возможность регистрации косейсмических скачков давления подземной воды подтверждается также данными измерения давления воды в скважине 1303 с частотой 1 Гц при наиболее сильных землетрясениях 2025 г., при которых понижение давления воды достигало -592 гПа (МЕр, $M_w=8.8$) и -176 гПа (сильнейший афтершок 18.09, $M_w=7.8$). Таким образом, данные наблюдений в двух скважинах в период сейсмической активизации 2025 г. на Камчатке доказывают возможность диагностики быстрой фазы косейсмического изменения статической деформации при сильных землетрясениях и получение соответствующих количественных оценок при проведении прецизионных измерений давления воды в пьезометрических скважинах, вскрывающих напорные подземные воды в скальных водовмещающих породах.

Во время сейсмической активизации были также зарегистрированы разнообразные изменения температуры и электропроводности подземной воды. Такие скважины находились преимущественно в ближних зонах очагов землетрясений на относительных расстояниях $d_h/L < 5$.

Список литературы

1. Болдина С.В., Болдина С.В., Копылова Г.Н., Кобзев В.А. Исследование эффектов землетрясений в изменениях давления подземных вод: аппаратура и некоторые результаты наблюдений в скважинах полуострова Камчатка // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13, № 2. С. 0594. – <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0594>.
2. Болдина С.В., Копылова Г.Н. Гидрогеологические эффекты сильных землетрясений в 2023–2024 годах // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. [Электронный ресурс]: Труды Десятой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский. 28 сентября–04 октября 2025 г. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2025. С. 32–38. <https://doi.org/10.35540/903258-536.2025.10.03>.
3. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Эффекты сейсмических волн в изменениях уровня воды в скважине: экспериментальные данные и модели // Физика Земли. 2020. № 4. С. 102–122. <https://doi.org/10.31857/S000233720030035>.
4. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Сейсмо-гидрогеодинамические эффекты в изменениях давления подземной воды (по данным многолетних наблюдений в скважинах Камчатки) // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. [Электронный ресурс]: Труды Десятой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский. 28 сентября–04 октября 2025 г. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2025. С. 52–57. <https://doi.org/10.35540/903258-536.2025.10.07>.
5. Завьялов А.Д., Зотов О.Д. Новый способ определения характерного размера очаговой зоны // Вулканология и сейсмология. 2021. № 1. С. 22–29. <https://doi.org/10.31857/S0203030621010065>.
6. Kopylova G., Boldina S. Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study from the Kamchatka Peninsula // Frontiers Earth Sciences. 2020. Vol. 8. P. 576017. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.576017>.
7. Kopylova G., Boldina S. A Verification of Seismo- Hydrogeodynamic Effect Typifications Recorded in Wells on the Kamchatka Peninsula: The 3 April 2023 Earthquake, $M_w = 6.6$, as an Example // Water. 2025. Vol. 17. P. 634. <https://doi.org/10.3390/w17050634>.
8. Kopylova G., Boldina S. Seismo-Hydrogeodynamic Effects in Groundwater Pressure Changes: A Case Study of the YuZ-5 Well on the Kamchatka Peninsula // Water. 2023. Vol. 15. P. 2174. <https://doi.org/10.3390/w15122174>.
9. Nespoli M., Yu H., Rinaldi A., et al. Applications and future developments of the (thermo-) poro-elastic theory in geophysics // Earth-Science Reviews. 2025. Vol. 260. P. 104996. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104996>.
10. Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. // Bull. Seismol. Soc. Am. 1992. Vol. 82. P. 1018–1040. <https://doi.org/10.1785/BSSA0820021018>.

КОМПЛЕКСНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДЗЗ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕРРИТОРИИ В ОБЛАСТИ КРИОЛИТОЗОНЫ

Пятов В.В., Дубровин К.А.

ФГБУ «Гидроспецгеология», Москва, pyatov@geomonitoring.ru

Аннотация. В работе представлены результаты комплексной обработки и интерпретации материалов космических съемок, выполненных в рамках регионального гидрогеологического картирования масштаба 1:1 000 000. Рассмотрена специфика применения данных дистанционного зондирования Земли для решения задач мелкомасштабного картографирования в условиях арктической зоны. Описаны методические подходы к идентификации источников наледеобразования, выявлению морфоструктурных особенностей и проявлений экзогенных процессов. Проанализирована корреляция полученных дешифровочных признаков с элементами тектонического строения и гидрогеологическими условиями территории.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спектрональные снимки, криолитозона, линейная тектоника, наледеобразование

Abstract. The paper presents the results of complex processing and interpretation of satellite imagery carried out within the framework of regional hydrogeological mapping at a scale of 1:1 000 000. The specifics of applying Earth remote sensing (ERS) data for small-scale mapping tasks in the Arctic zone are examined. Methodological approaches to identifying icing formation sources, revealing morphostructural features, and detecting exogenous processes are described. The correlation between the obtained interpretation signs, tectonic structural elements, and the hydrogeological conditions of the territory is analyzed.

Keywords: remote sensing, multispectral imagery, cryolithozone, lineament tectonics, icing formation

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на современном этапе развития геологосъемочных работ выступают одним из ключевых источников картографической информации. Особую актуальность их применение приобретает при изучении арктических территорий, характеризующихся труднодоступностью, сложными природно-климатическими условиями и высокой ресурсоемкостью проведения непосредственных наземных маршрутов.

Объектом исследования является территория, расположенная в арктической зоне Республики Саха (Якутия) и охватывающая северную оконечность Верхоянского хребта. В структурно-тектоническом отношении район приурочен к зоне сочленения двух крупных геологических структур – Верхояно-Колымской складчатой области и Сибирской платформы, представленной в данной зоне Приверхоянским краевым прогибом.

Орографически Верхоянский хребет здесь выступает региональным водоразделом между бассейном моря Лаптевых и водосборными бассейнами крупных рек Лена и Омолой. Исследуемая площадь полностью расположена севернее полярного круга, в пределах субарктического климатического пояса. Климатические условия характеризуются как суровые, с продолжительной холодной и малоснежной зимой. Ландшафтная структура территории представлена преимущественно северотаяжными, тундровыми и горно-тундровыми комплексами.

В рамках проведения работ по региональному гидрогеологическому картированию масштаба 1:1 000 000 (лист R-52, Тикси) использовался комплексный подход к обработке и интерпретации материалов дистанционного зондирования [5]. Информационную основу исследования составили мультиспектральные снимки космических аппаратов Sentinel-2 и Landsat-8, данные радарной интерферометрии (SRTM), а также высокодетальные картографические материалы открытых веб-сервисов [9].

Необходимо отметить высокую эффективность применения мелкомасштабных глобальных радиометрических съемок [8] в условиях арктических регионов. Благоприятные условия для дешифрирования здесь определяются спецификой ландшафта: низкой степенью залесенности (высокой обнаженностью), а также отсутствием значительной антропогенной нагрузки и плотной городской застройки.

Целевым назначением дешифрирования материалов космических съемок являлось получение новых данных о геолого-гидрогеологическом строении и геоэкологических характеристиках изучаемой площади. В ходе исследования был выработан комплексный методический подход, основанный на интеграции данных ДЗЗ с массивом геологической информации, а также информации о ландшафтах.

Методологический базис работы опирается на представление крупного географического региона как целостной геосистемы с развитой сетью межкомпонентных связей [2]. В рамках данной концепции внешняя географическая оболочка (совокупность ландшафтов), наиболее отчетливо представленная на космоснимках, рассматривается как подсистема, имеющая прямые или косвенные корреляции с внутренним геологическим строением и эндогенными процессами. Поскольку индикационные связи между компонентами геосистемы не всегда очевидны, исследователю необходимо применять гибкую стратегию анализа. Последняя включает как принцип последовательных приближений (дедуктивный метод: от генерализованных региональных представлений к выявлению локальных аномалий), так и индуктивный подход (от частного к общему), при котором совокупность выявленных локальных объектов и особенностей в результате генерализации формирует общую региональную характеристику исследуемой территории.

Основными методами дешифрирования [6, 7] и гидрогеологической интерпретации выступали: прямое визуальное наблюдение, морфоструктурный и ландшафтный анализ, спектральная и линеamentная обработка, выявление физиономичных особенностей (дешифровочных признаков) территории, а также методы полуавтоматической классификации. Аналитический процесс сочетал в себе как экспертное визуальное дешифрирование в ручном режиме, так и автоматизированную машинную обработку данных.

Алгоритм работы с материалами ДЗЗ включал следующую последовательность действий:

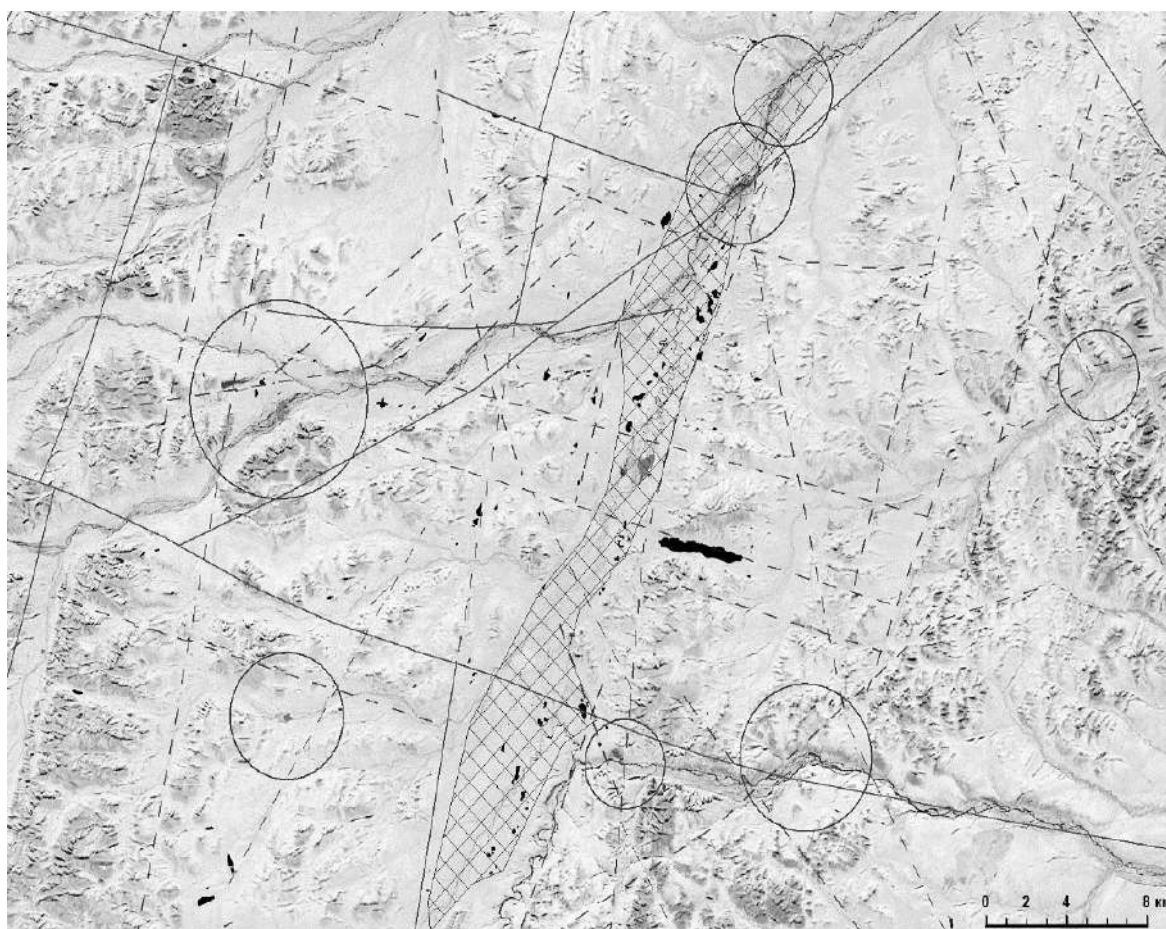
- 1) сбор и систематизация доступных материалов ДЗЗ;
- 2) построение цифровой модели рельефа на основе матриц высот радарных съемок;
- 3) создание многоканальных композитных изображений из отдельных спектральных каналов с подбором наиболее информативных комбинаций для конкретных задач;
- 4) геопривязка снимков к топографической основе и интеграция с материалами ранее проведенных исследований;
- 5) оконтуривание однородных участков изображения, их типизация и распознавание ландшафтных особенностей выделенных элементов;
- 6) сравнительный анализ и верификация полученных результатов дешифрирования с данными предшествующих геологических, гидрогеологических и геоэкологических работ различного масштаба.

На основе мультиспектральных снимков создаются многоканальные композитные изображения и выявляются наиболее информативные сочетания спектральных каналов [11, 12]. По результатам морфоструктурного, ландшафтного и спектрального анализа были установлены границы отдельных тектонических блоков, обладающих различными гидрогеологическими характеристиками. Границы данных структур, как правило, маркируются резкой сменой ландшафтного рисунка и характера расчленения рельефа [8], иногда с формированием переходных зон.

На основе характерных ландшафтных и спектральных признаков [1, 10, 11] произведена идентификация участков предполагаемой разгрузки подземных вод [4]. Данные зоны часто образуют узлы наледообразования, определяющие режим распространения наледей в речных долинах. Дополнительно выделены и генерализованы ареалы проявления экзогенных процессов (термокарст, заболачивание, образование термокарстовых озер), которые служат косвенными индикаторами региональных гидрогеологических особенностей, связанных с глубинным тектоническим строением [4].

Методика линеamentного анализа, направленная на выявление зон тектонической дислокации [3], включала как трассирование явно выраженных линейных элементов, так и распознавание скрытых структур, проявленных в виде цепочек взаимосвязанных ландшафтных элементов без явного линейного рисунка. В результате анализа установлена значимая пространственная корреляция между линеamentной тектоникой и источниками наледееобразования (рисунок).

С использованием полуавтоматической классификации выделены наборы объектов со схожими спектральными характеристиками. Составленные карты плотности дешифрируемых объектов были сопоставлены с результатами морфометрического [2] анализа и линеamentной тектоникой. Комплексная интерпретация позволила получить новые данные о разломной тектонике, криогенных процессах и проследить их связь с геологическим строением [4], что нашло отражение в итоговой аналитической схеме межкомпонентных связей геосистемы для исследуемой территории.



Выделенные узлы наледееобразования в сети линеamentов и закартированных разломов на спектральнозональном снимке Sentinel-2. Северная Якутия.

Эффективность региональной гидрогеологической съемки в условиях криолитозоны может быть существенно повышена благодаря использованию данных ДЗЗ различного спектрального диапазона и пространственного разрешения. Радиометрические и спектральнозональные материалы позволяют выделять обширные зоны с уникальными наборами характеристик и проводить их корреляцию с уже имеющейся геолого-гидрогеологической информацией. Такой интегрированный подход обеспечивает возможность дистанционного изучения геологических объектов и процессов в сложных по комплексу условий территориях, а также способствует более точному моделированию гидрогеологической обстановки, снижая при этом затраты на наземные исследования и ускоряя получение итоговых результатов.

В заключение необходимо отметить методологическую важность индивидуального подхода к исследованию каждой крупной региональной геосистемы. Любая географическая оболочка, ограниченная рамками картографического листа или естественными рубежами, представляет собой уникальную систему с присущим только ей набором взаимосвязанных компонентов. В связи с этим стратегия дешифрирования не может быть шаблонной. Анализ целесообразно начинать с общего обзора территории и выявления аномальных, физиономически выраженных объектов (индикаторов), которые впоследствии генерализуются в единые визуальные и структурные системы, формируя целостное представление о региональных особенностях территории.

Список литературы

1. Алексеев В.Р. Наледеведение: словарь-справочник. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 438 с.
2. Бондаренко М.А., Михайлов В.А. Ландшафтно-морфометрический анализ территории с помощью ГИС (на примере северного макросклона Главной гряды Крымских гор) // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 8. Ч. 2. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/08/57127>.
3. Волошин Д.В., Волкова В.А., Басько К.С. Анализ линеаментной тектоники как фактора современной геодинамической активности недр в условиях сплошного развития многолетней мерзлоты // Материалы Общероссийской научно-практической конференции (Москва, 17 марта 2023 г.). М.: Геомаркетинг, 2023. С. 9–18.
4. Гидрогеология СССР. Т. XX. Якутская АССР. М.: Недра, 1970. 384 с.
5. Губин В.Н. Дистанционные методы в геологии: учебное пособие. Минск: БГУ, 2003. 127 с.
6. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований: учеб. для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 336 с.
7. Корсаков А.К., Корчуганова Н.И. Дистанционные методы геологического картирования: учебное пособие. М.: КДУ, 2009. 288 с.
8. Обуховский Ю.М. Ландшафтная индикация: учебное пособие. Минск: БГУ, 2008. 299 с.
9. Оньков И.В. Оценка точности высот SRTM для целей ортотрансформирования космических снимков высокого разрешения // Геоматика. 2011. № 3.
10. Топчиев А.Г. Методы аэрокосмического мониторинга наледных геосистем и подземных вод криолитозоны // Системы и средства информатики. 2008. Т. 18, № 3. С. 304–327.
11. Шихов А.Н., Герасимов А.П., Пономарчук А.И., Перминова Е.С. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого разрешения. Пермь: ПГНИУ, 2020. 191 с. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchukperminova-tematicheskoe-deshifrovanie-i-interpretaciyakosmicheskikh-snimkov.pdf>.
12. Интерпретация комбинаций каналов данных Landsat TM / ETM+ [Электронный ресурс]. URL: <https://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html>.

ГИДРОГЕОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ В 2016–2020 гг.

Светлаков А.А.¹, Алексеев С.В.¹, Алексеева Л.П.¹, Добрынина А.А.^{1,2,3}, Балобаненко А.А.⁴

¹*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, svetlakov@crust.irk.ru*

²*Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ*

³*Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, Иркутск*

⁴*Сибирский региональный центр ГМСН филиал ФГБУ «Гидроспецгеология», Томск*

Аннотация. В статье представлены результаты гидрогеосейсмологического мониторинга в пределах Байкальской природной территории (2016–2020 гг.). На основе данных с трех наблюдательных пунктов (Северобайкальск, Усть-Баргузин, Култук) выявлено изменение гидрогеологических параметров при землетрясении энергетического класса $K \geq 12$. Приводятся данные о связи гидрогеологических предвестников, а также косейсмических и постсейсмических событий с параметрами землетрясений.

Ключевые слова: гидрогеосейсмология, параметры подземных вод, землетрясения

Abstract. This article presents the results of hydrogeoseismological monitoring conducted within the Baikal Natural Territory in 2016–2020. Data from three observation sites (Severobaykalsk, Ust-Barguzin, and Kultuk) were used to identify changes in hydrogeological parameters caused by earthquakes of energy class $K \geq 12$. The relationship between hydrogeological precursors, coseismic and postseismic effects, and the parameters of subsequent earthquakes is discussed.

Keywords: hydrogeoseismology, groundwater parameters, earthquakes

Исследования в области сейсмологии и гидрогеологии имеют разные цели, при этом остаются общие задачи, решение которых требует комплексного анализа. Сейсмические процессы изменяют напряженно-деформированное состояние пород, что приводит к развитию трещин дилатансии и влечет за собой образование новых фильтрационных каналов. Происходит перераспределение пластового давления и активизация миграции химических элементов, что существенно изменит гидродинамические и физико-химические свойства подземных вод.

Основным направлением гидрогеосейсмологии является развитие научно-методических основ гидрогеологического мониторинга и поиска предвестников землетрясений. В СССР гидрогеосейсмические наблюдения начались в 70-х гг. в Средней Азии, Казахстане, Закавказье, на Байкале, Камчатке, Курилах и Сахалине. По результатам исследований в сейсмоактивных районах отмечено изменение режима подземных вод в виде косейсмических и постсейсмических эффектов [1, 2]. В 70–90-х гг. материалы гидрогеосейсмических наблюдений позволили выделить изменения гидродинамических, гидрохимических и гидротермических параметров подземных вод на стадии подготовки землетрясения – предвестники события [4, 8].

В настоящее время основным вектором развития гидрогеосейсмологического направления является разработка научно-методических основ гидрогеологического метода мониторинга и поиска предвестников землетрясений, а также оценка связи между гидрогеологическими предвестниками и вариациями сейсмичности [3, 5, 6]. Цель данной работы – анализ гидрогеологических параметров в скважинах Байкальского региона и выявление откликов среды на сейсмическую активность.

В пределах Байкальской природной территории (БПТ) гидрогеосейсмические исследования проводились в 1980 г., но не имели длительных рядов наблюдений [8]. В настоящее время мониторинг параметров подземных вод возобновлен ФГБУ «Гидроспецгеология» совместно с сотрудниками ИЗК СО РАН. Первые уровнемеры установлены в 2015 г. на гидрогеологических пунктах наблюдения в пос. Култук, пос. Листвянка, г. Байкальск и с. Исток. В качестве измерительных приборов использовали гидростатические уровнемеры «КЕДР–ДМЗ», которые предназначены для измерения статического уровня жидкости. Уровнемеры оборудованы датчиками калибровочного

давления, атмосферного давления, температуры и электропроводности. Разрешающая способность гидроstaticеского уровнемера для диапазонов от 0 до 10 м составляет 1 мм, предел допускаемой погрешности ± 0.25 %, точность датчика температуры – 0.1 °C, удельная электропроводимость – от 1 до 2 мкСм/см. Гидрогеологические параметры, такие как уровень подземных вод, температура воды и удельная электропроводимость, фиксировались каждый час и по сотовой связи передавались на электронный носитель.

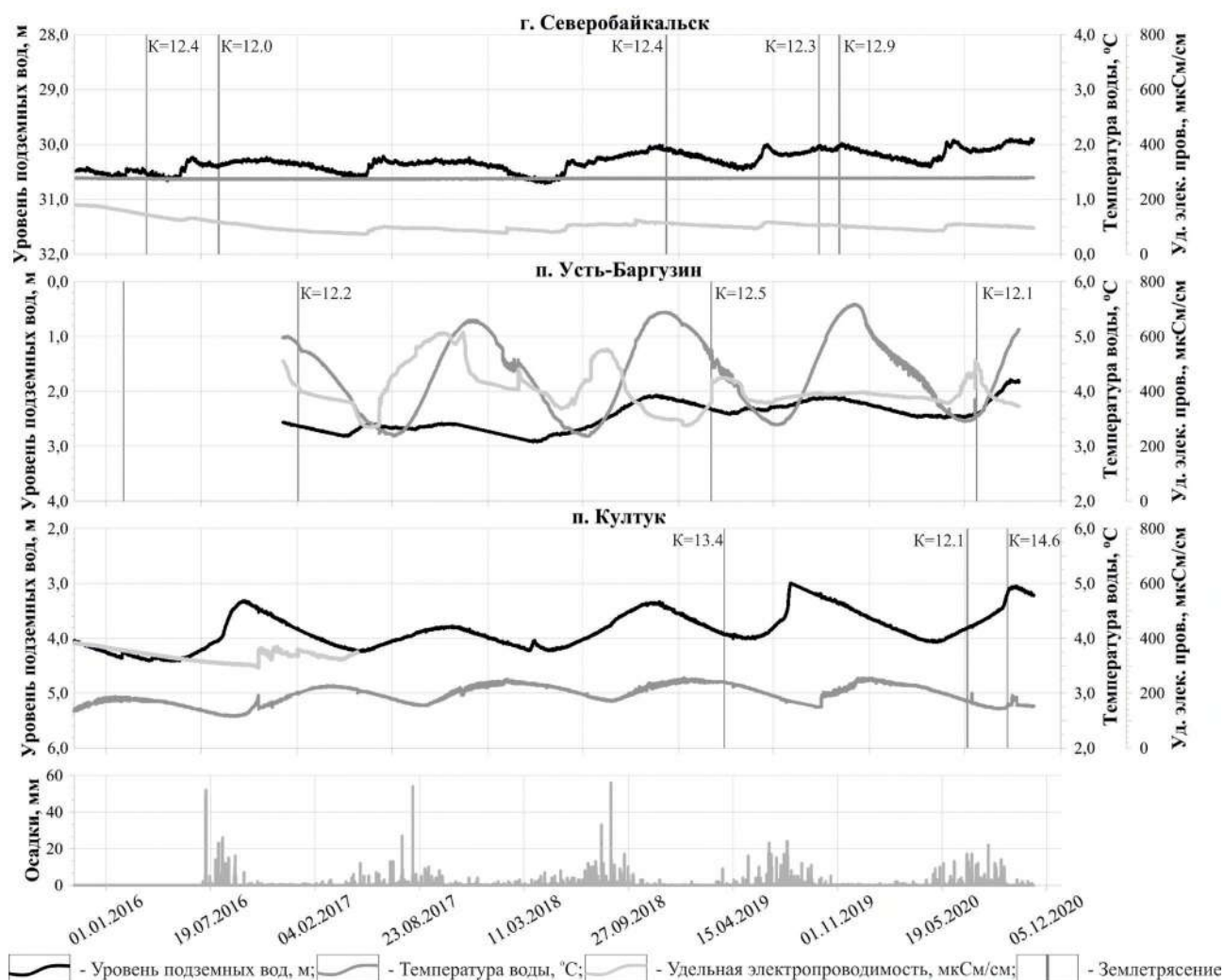
В 2020 г. мониторинговая сеть состояла из 14 гидрогеологических пунктов, дополнительно пробурены и восстановлены скважины в пос. Усть-Баргузин, г. Северобайкальск, пос. Хужир, пос. Селенгинск, с. Сотниково, пос. Большое Голоустное, с. Еланцы, г. Бабушкин, г. Слюдянка и пос. Солзан, которые охватывали акваторию оз. Байкал в пределах БПТ. Стоит отметить, что БПТ расположена в пределах Байкальской рифтовой системы, которая простирается на 1600 км от Монголии до Южной Якутии и характеризуется высоким уровнем сейсмической активности [10]. С начала инструментальной регистрации (1950 г.) по данным Байкальского филиала Геофизической службы СО РАН произошло 17 землетрясений энергетического класса $K \geq 14.6$. Слабых и умеренных событий ($K \geq 7$) насчитывается до 10 тыс. в год [7].

В 2016–2020 гг. в пределах БПТ отмечено более 150 землетрясений энергетического класса от $K=9$ до $K=14.6$, большинство зафиксированы в Северо-Байкальском, Курумканском, Усть-Баргузинском, Ольхонском, Кабанском и Тункинском районах. Самым сильным землетрясением за период 2016–2020 гг. стало Быстринское землетрясение энергетического класса $K = 14.6$ и магнитудой $M = 5.6$, произошедшее в пределах Торско-Быстринской межвпадинной перемычки на участке сочленения магистральных сместителей Главного Саянского и Тункинского разломов [9].

По интенсивности и повторяемости землетрясений в пределах БПТ можно выделить три основные сейсмоактивные зоны: северную – районы Баргузинской и Верхнеангарской впадин; центральную – район Центрального Байкала от п-ова Святой Нос до дельты р. Селенги; южную – область Тункинской системы впадин и Южного Прибайкалья. Наиболее представительными гидрогеологическими пунктами для каждой сейсмоактивной зоны являются: северная – г. Северобайкальск; центральная – пос. Усть-Баргузин; южная – п. Култук (рисунок).

Гидрогеологический пункт наблюдения в г. Северобайкальске отличается стабильными условиями: подземные воды находятся на глубине ниже 30.0 м, сезонное колебание уровня не превышает 0.6 м; температура воды составляет 1.4 °C; удельная электропроводимость изменяется в пределах от 80 до 180 мкСм/см.

За период 2016–2020 гг. в пределах северной сейсмоактивной зоны произошло пять землетрясений с магнитудой $M < 5$ и энергетическим классом от $K = 12.0$ до $K = 12.9$ (рисунок). Изменение уровня подземных вод характеризуется небольшими и плавными поднятиями, которые вызваны слабыми землетрясениями. Показатели температуры и удельной электропроводимости не изменялись. Реакция гидрогеологической среды указывает на постепенный рост тектонического напряжения: при слабых землетрясениях зафиксировано небольшое повышение уровня подземных вод на 4–7 см, которое проявляется до сейсмособытия, достигая апикальной части в момент землетрясения. Гидрогеологический пункт в пос. Усть-Баргузин организован в конце 2016 г., уровень подземных вод вскрыт на глубине 2.6 м, сезонные колебания не превышали 0.8 м, температура воды изменяется в диапазоне от 2.7 до 5.6 °C, показатели удельной электропроводимости варьировались от 250 до 650 мкСм/см. В период исследования на участке центральной сейсмоактивной зоны произошло три землетрясения с эпицентром в 30 км от пос. Усть-Баргузин. Магнитуда составила $M < 5$, и энергетический класс изменялся от $K = 12.1$ до $K = 12.5$ (рисунок). Характер проявления гидрогеосейсмических вариаций в основном связан с резкими изменениями параметров и отразился в виде косейсмических и постсейсмических эффектов. Колебания температуры достигали 0.4 °C, удельной электропроводимости – 90 мкСм/см, изменение уровня подземных вод было незначительным.



Динамика гидрогеологических параметров по данным мониторинга 2016–2020 гг.

Для гидрогеологического пункта в пос. Култук характерно сезонное колебание уровня подземных вод, которое варьируется в диапазоне 1.0–1.2 м и зависит от количества атмосферных осадков. Глубина залегания подземных вод изменяется в пределах от 3.0 до 4.4 м, а температура воды – от 2.6 до 3.3 °С. Показатели удельной электропроводности записывались в течение короткого периода с 2016 по 2017 г. и изменялись в пределах от 350 до 450 мкСм/см.

В пределах южной сейсмоактивной зоны БПТ за период 2016–2020 гг. можно выделить три землетрясения, которые отличаются энергетическим классом и характером проявления (рисунок). Первое землетрясение произошло на расстоянии 150 км от пункта Култука с энергетическим классом $K = 13.4$. Реакция подземной гидросферы представлена в виде постсейсмического эффекта и незначительного поднятия уровня подземных вод на 5 см. Второе землетрясение произошло на расстоянии 60 км от пункта в Култуке, с энергетическим классом $K = 12.1$ и магнитудой $M = 4.5$. Зафиксировано понижение уровня подземных вод на 10 см и изменение температуры на 0.2 °С в виде постсейсмического эффекта. Самым сильным за весь период наблюдений стало третье (Быстринское) землетрясение. Энергетический класс Быстринского землетрясения составил $K = 14.6$, магнитуда $M = 5.6$, эпицентр находился в 20 км от пункта в Култуке. За 10 дней до землетрясения отмечалось anomalous повышение уровня подземных вод с глубины 3.45 до 3.10 м, максимальный уровень зафиксирован в момент землетрясения и удерживался в течение трех дней, что связано с продолжительными афтершоками. Атмосферных осадков в период августа – сентября не зафиксировано, соответственно их влияние на уровень подземных вод минимально.

Анализ гидрогеосейсмических вариаций в пределах Байкальской природной территории в период 2016–2020 гг. показал, что изменение гидродинамических, гидротермических и гидрохимических параметров происходит при землетрясениях от слабых до умеренных с энергетическим классом $12 \leq K < 15$. Гидрогеологический отклик на сейсмичность в разных зонах БПТ различается по форме, интенсивности и времени проявления, что обусловлено локальными тектоническими факторами, удаленностью от эпицентра и энергетическим классом событий.

Список литературы

1. Барсуков В.Л., Серебренников В.С., Варшал Г.М., Гаранин А.В. Геохимические методы прогноза землетрясений // Геохимия. 1979. № 3. С. 323–338.
2. Войтов Г.И., Осица Д.Г., Гречухина Г.Г., Плотников И.А. О некоторых геолого-геохимических последствиях Дагестанского землетрясения 14 мая 1970 г. // Докл. АН СССР. 1972. Т. 202, № 3. С. 576–579.
3. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Батухтин И.В., Петухова С.М. и др. Реакция водонасыщенных коллекторов на динамическое воздействие (по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод) // Физика Земли. 2021. № 5. С. 74–90.
4. Киссин И.Г. Гидрогеологический мониторинг земной коры // Физика Земли. 1993. № 8. С. 58–69.
5. Копылова Г.Н. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977–2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. С. 3–20.
6. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки. Петропавловск-Камчатский: ООО «Камчатпресс», 2019. 144 с.
7. Масальский О.К., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А. Современное состояние сейсмических наблюдений в Прибайкалье // Материалы Второй международной сейсмологической школы / Под редакцией В.И. Уткина. Обнинск: ГС РАН, 2007. С. 140–144.
8. Пиннекер Е.В., Ясько В.Г., Шкандрий Б.О. Результаты изучения гидрогеологических предвестников землетрясений в Байкальской рифтовой зоне // Гидрогеохимические предвестники землетрясений. М.: Наука, 1985. С. 259–265.
9. Семинский К.Ж., Борняков С.А., Добрынина А.А. и др. Быстринское землетрясение в Южном Прибайкалье (21.09.2020 г., $M_w = 5.4$): основные параметры, признаки подготовки и сопровождающие эффекты // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 5. С. 727–743.
10. Logatchev N.A., Florensov N.A. The Baikal system of rift valleys // Tectonophysics. 1978. Vol. 45. P. 1–13.

РОЛЬ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ПЛАСТОВ НА КОВЫКТИНСКОМ ГКМ

Смирнов А.С.^{1,2}

¹Тюменский индустриальный университет, Тюмень, smirnovas@tyuiu.ru

²Институт земной коры СО РАН, Иркутск

Аннотация. Сложные гидрогеологические условия осадочного комплекса Иркутского амфитеатра создают определенные трудности при исследовании поисковых, разведочных и эксплуатационных скважин Ковыктинского месторождения. Изучение пластовых вод и рассолов включает в себе чрезвычайно ценную информацию, которую не могут дать никакие другие виды исследований. Эта информация может быть получена путем последовательного соблюдения этапности и стадийности при геологоразведочных работах, соблюдения всех требований на каждом этапе и применения соответствующих методов исследования скважин, давших притоки пластовых вод.

Ключевые слова: Иркутский амфитеатр, литиеносные рассолы, Ковыктинское месторождение, АВПД, газоводяной контакт

Abstract. The complex hydrogeological conditions of the Irkutsk amphitheater sedimentary complex pose certain challenges when exploring prospecting, exploratory, and production wells at the Kovykta field. Studying formation waters and brines provides extremely valuable information that cannot be obtained by any other type of research. This information can be obtained by consistently adhering to a sequential and staged approach to geological exploration, adhering to all requirements at each stage, and applying appropriate methods to wells that have produced formation water inflows.

Keywords: Irkutsk amphitheater, lithium-bearing brines, Kovykta field, abnormally high formation pressure, gas-water contact

Подземные воды Ангара-Ленского артезианского бассейна [13, 16], куда входит территория Ковыктинского месторождения, характеризуются широким диапазоном минерализации – от пресных вод до насыщенных рассолов, из которых кристаллизуются соли. По степени минерализации выделяют четыре группы рассолов (слабые, крепкие, весьма крепкие и предельно насыщенные).

Каждая из представленных групп рассолов характеризуется определенным химическим составом, которые достаточно хорошо изучены гидрогеологами в предыдущие годы [1, 11, 16].

Наиболее схожим с Ковыктинским месторождением и изученным с гидрогеологических позиций в Иркутском амфитеатре является Братское месторождение. Материалы по Братскому месторождению являлись базовыми при оценке задач и обязательного комплекса исследований гидрогеологических объектов, выполненных на различных этапах и стадиях ГРП [14, 15].

К сожалению, на стадиях доразведки и ввода Ковыктинского месторождения в эксплуатацию при проведении гидрогеологических исследований не были выполнены стандартные задачи по исследованию водонасыщенной части всего осадочного чехла (зона АВПД и АНПД), а именно: достижение постоянства минерализации вод (рассолов) в стволе скважины вне зависимости от дебита; установление в зоне продуктивного пласта статического равновесия, необходимого для всех последующих исследований; изучение характера взаимосвязи открытых залежей газа с законтурными областями водоносных горизонтов и др.

Сложно оценить все имеющиеся результаты гидрогеологических исследований в пределах Ковыктинского месторождения и делать какие-либо выводы и заключения (положение газоводяного контакта, сведения о миграции углеводородов и т.д.) по гидрохимическим особенностям всей осадочной толщи, в том числе и парфеновского горизонта, основного продуктивного объекта Иркутского центра газодобычи [12], так как кондиционными признаны менее 5 % из всех отобранных проб по терригенной части разреза рассматриваемого месторождения.

За счет каких же объективных факторов, присущих Ковыктинскому месторождению,

не удавалось или не удастся провести полноценные гидрогеологические исследования?

Особенностью геологического строения Ковыктинского ГКМ является наличие пластов аномально гидропроводных трещинных межсолевых коллекторов с аномальновысокими пластовыми давлениями флюидов – рапы, газа (АВПД [2, 4, 5, 6, 9, 17]) в средней части разреза осадочного чехла, на глубине 1300–2000 м. Вскрытие забоем скважины, к примеру Квт-75, высокодебитных (до 5–7 тыс. м³/сут) рапогазопроявляющих трещинных пластов-коллекторов затрудняет бурение скважин на нижележащие горизонты (3300 – 3600 м) с углеводородным (УВ) насыщением и аномально низким пластовым давлением (АНПД), таким как парфеновский горизонт. Продолжение бурения без перекрытия высоконапорных продуктивных пластов невозможно в силу несовместимости условий бурения. Зоны АВПД характеризуются очень высоким пластовым давлением (более 40 МПа на глубинах по вертикали 1300–2000 м) и насыщением в виде предельно минерализованных рассолов (плотность до 1450 кг/м³). При этом при продолжении бурения на тяжелом буровом растворе плотностью более 2420 кг/м³ либо с противодавлением при бурении с регулируемым давлением возможно самопроизвольное возникновение гидроразрыва в нижележащих по разрезу «слабых» пластах. В этом случае в скважине между высокодебитным рапогазопроявляющим и поглощающим пластами возникает межпластовый переток, который крайне сложно ликвидировать. Одной из значимых особенностей такого перетока является то, что зона искусственной трещины авто-ГРП формируется самопроизвольно, и с момента зарождения трещины рапопроявляющий пласт поддерживает давление (перепад давления, репрессию) в стволе скважины, обеспечивающее непрерывное расширение области распространения трещины авто-ГРП, т.е. поддерживает авто-ГРП-процесс подобно тому, как это реализуется при плановом создании и закреплении искусственной ГРП-трещины. Второй значимой особенностью такого межпластового перетока в скважине в интервале между пластами рапогазопроявляющим и поглощающим является расход флюида (рапа, газ) на уровне нескольких тысяч м³/сут.

Еще одна особенность солевой формации Ковыктинского ГКМ – наличие пластов калийных солей, которые являются реологически неустойчивыми, более подвижными и более склонными к пластическим деформациям, чем натриевые соли. При одновременном вскрытии бурением пластов натриевых и калиевых солей более пластичные калиевые соли деформируются и начинают медленное пластическое «течение» в область ствола скважины. Этот процесс продолжается и во время бурения. Далее вслед за калиевыми солями в образовавшиеся области разгрузки горного давления начинают свое «движение» и натриевые соли (галит). После начала необратимой деформации массива каменных солей, его сдвигения данный процесс на практике достаточно трудно остановить. Таким образом, весь интервал массива соленосной толщи, вскрытый скважинами, представляет собой зону потенциального возникновения смятия обсадной колонны [3, 17, 21] после крепления ствола скважины обсадной колонной, с использованием усредненных (проектных) тампонажных смесей, не подходящих для рассматриваемой солевой формации [18, 19, 22].

По результатам крепления заколонных пространств скважин Ковыктинского месторождения можно отметить, что работы выполнены в соответствии с технологическими решениями, отраженными в проектах на строительство скважин. Однако по результатам ГИС (АКЦ ОК245, АКЦ ОК178) скважин [18, 19] можно говорить о полном отсутствии и частичном контакте цемента и породы, т.е. о возможном межпластовом перетоке рассолов в нижележащий интервал, т.е. парфеновский горизонт, по каналам миграции, несмотря на использование пакеров при отборе флюидов в открытом стволе. Предварительный химический состав отобранных глубинных и устьевых проб совпадает с пластовыми водами (рассолами) вышележащих интервалов, таких как христофоровско-балыхтинский комплекс.

Значительные сложности в анализе имеющихся гидрогеохимических данных связаны с оценкой качества информации. Как правило, некачественность анализов обусловлена попаданием в пробу пластовой воды технических жидкостей вследствие некачественного

отбора пробы, недостаточной очистки интервала опробования скважины от технических жидкостей, недостаточного освоения объектов, наличия заколонных перетоков и т.д.

Также хотелось бы обратить внимание на некоторые региональные геологические особенности изучения Ковыктинского месторождения [7, 20].

На текущий момент контуры продуктивности Ковыктинского месторождения по парфеновскому горизонту венда расширены по результатам ГРП последних лет в области южного замыкания Предпатомского регионального прогиба и гипсометрические отметки резервуара растут (по кровле горизонта) в юго-восточном направлении в наиболее высокую область Верхнеленского поднятия [7].

Всем известный моноклиальный склон Ангара-Ленской ступени от ангарских структур до Ковыктинского выступа, на котором в течение почти 70 лет проводятся основные ГРП на УВ сырье, является только частью гигантского Верхнеленского сводового поднятия [7]. Унаследованное поднятие с нижнего палеозоя и до современного времени сформировало «перекос» ложа и осадочного чехла платформенной части Иркутского амфитеатра. Это явление сопровождалось неравномерными субвертикальными движениями краевых прогибов – Ангара-Ленского и Ангара-Саянского – в результате различных по амплитуде тектонических движений [7].

Локализация Ковыктинского месторождения в зоне сочленения двух региональных геологических структур – веское основание к пересмотру геологической модели формирования структурного плана природных резервуаров (кембрий, венд, рифей), процессов миграции, аккумуляции и заполнения пластовыми углеводородными системами на заключительном кайнозойском этапе переформирования залежей УВ, с возможным смешанным насыщением, включая наличие флюида типа пластовой воды [7].

Полученные на сегодняшний день материалы не позволяют однозначно определить генезис подземных вод и требуют проведения дополнительных исследований, в том числе и гидрогеологических, а также специальных исследований по подбору тампонажных смесей для надежного крепления обсадных колонн в интервале солевой формации Ковыктинского месторождения, которая составляет около 1000 м [10, 17, 18, 19, 22].

Несмотря на широкий спектр геологических задач (региональные, площадные и локальные), которые остаются при доизучении Ковыктинского месторождения, основными нерешенными остаются гидрогеологические особенности (генезис, химический состав, объем и др.) пластовых вод и рассолов. Возможно наличие новых, ранее не опосредованных региональных водоносных горизонтов (ковинский, надпарфеновский, подпарфеновский и др.) в пределах Ковыктинского месторождения и сателлитов даст нам понимание для получения более достоверных геологических моделей как текущих объектов разработки, так и новых в терригенном и в карбонатном комплексе, в том числе залежей гидроминерального сырья (литиеносные рассолы) [5, 10, 11].

Список литературы

1. Анциферов А.С. Гидрогеология древнейших нефтегазоносных толщ Сибирской платформы. М.: Недра, 1989. 176 с.
2. Белонин М.Д., Славин В.И., Чилингар Д.В. Аномально высокие пластовые давления. Происхождение, прогноз, проблемы освоения залежей углеводородов // Под ред. Н.С. Окновой. СПб.: Недра, 2005. 324 с.
3. Вахромеев А.Г., Толкачев Г.М., Козлов А.С. и др. Снятие обсадных колонн при бурении скважин в соленосном комплексе юга Сибирской платформы // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2018. № 10. С. 42–49. DOI 10.30713/0130-3872-2018-10-42-49.
4. Вахромеев А.Г., Горлов И.В., Мисюркеева Н.В. и др. Гидрогеологические основы локального прогноза флюидапоносных систем с аномально высоким пластовым давлением в карбонатных природных резервуарах кембрия Ковыктинского газоконденсатного месторождения // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2018. № 4(36). С. 49–59.
5. Вахромеев А.Г., Горлов И.В., Смирнов А.С. и др. Фонтанные проявления предельно насыщенных литиеносных рассолов в скважинах на юге Сибирской платформы: бурение, испытание, прогноз флюидных систем с АВПД // Подземные воды востока России: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным

участием), Новосибирск, 18–22 июня 2018 года. Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2018. С. 27–32.

6. Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Смирнов А.С., Горлов И.В. Бурение скважин на нефть и газ в условиях аномально проницаемых трещинных коллекторов с аномально высоким пластовым давлением флюидной системы // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2019. № 5. С. 11–18. DOI 10.30713/0130-3872-2019-5-11-18.

7. Вахромеев А.Г., Смирнов А.С., Мазукабзов А.М. и др. Верхнеленское сводовое поднятие – главный объект подготовки ресурсной базы углеводородного сырья на юге Сибирской платформы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2019. № 3(39). С. 38–56. DOI 10.20403/2078-0575-2019-3-38-56. – EDN BKYUE.

8. Вахромеев А.Г., Ташкевич И.Д., Сверкунов С.А. и др. Качество вскрытия бурением продуктивных терригенных пластов газоконденсатных месторождений Верхнеленского поднятия – базовая задача в цикле заканчивания // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2020. № 9(333). С. 25–36. DOI 10.33285/0130-3872-2020-9(333)-25-36.

9. Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Смирнов А.С. и др. Бурение скважин на нефть и газ в коллекторах с АВПД в условиях межпластового перетока // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2020. № 8(332). С. 18–25. DOI 10.33285/0130-3872-2020-8(332)-18-25.

10. Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Близнюков В.Ю. и др. Технологические варианты первичного вскрытия бурением рапоносных пластов с АВПД трудноизвлекаемых флюидов – литиеносных рассолов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2025. № 1(385). С. 19–30.

11. Вожов В.И. Подземные воды и гидроминеральное сырье Лено-Тунгусской нефтегазовой провинции. Новосибирск: Изд-во СНИИГИМС, 2006. 209 с.

12. Огибенин В.В., Горлов И.В., Смирнов А.С. и др. Эффективность проведения геологоразведочных работ с целью создания Иркутского центра газодобычи // Мировые ресурсы и запасы газа и перспективные технологии их освоения (WGRR-2017): Тезисы докладов IV Международной научно-практической конференции, Москва, 08–10 ноября 2017 года. М.: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ", 2017. С. 43.

13. Основы гидрогеологии. Общая гидрогеология. Новосибирск: Наука, 1980. 225 с.

14. Павленко В.В. Методическое руководство по исследованию водоносных скважин иркутского амфитеатра. Иркутск: ВСИИИГГиМС, 1974.

15. Павленко В.В. Методические рекомендации по исследованию водонасыщенных горизонтов в нефтегазопоисковых скважинах юга Сибирской платформы. Иркутск: ВСИИИГГиМС, 1982.

16. Пиннекер Е.В. Рассолы Ангара-Ленского артезианского бассейна. М.: Наука, 1966.

17. Рапогазопроявления и аномально высокие пластовые давления литиеносных рассолов на юге Сибирской платформы: (флюидогеодиническая интерпретация геолого-геофизических и геопромысловых данных; прогноз горно-геологических условий, инновационные подходы и решения в бурении и освоении Ковыктинского газоконденсатного месторождения). Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. 330 с.

18. Самсоненко Н.В., Калужин Е.К. Анализ проектных материалов и технологий для первичного цементирования эксплуатационных скважин по "легкой" конструкции в условиях Ковыктинского ГКМ // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2025. № 4(388). С. 24–31.

19. Самсоненко Н.В., Калужин Е.К. Оценка качества первичного цементирования обсадных колонн в скважинах Ковыктинского ГКМ и рекомендации по его повышению // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2025. № 5(389). С. 21–29.

20. Смирнов А.С., Горлов И.В., Яицкий Н.Н. и др. Интеграция геолого-геофизических данных – путь к созданию достоверной модели Ковыктинского газоконденсатного месторождения // Геология нефти и газа. 2016. № 2. С. 56–66.

21. Способ локального прогноза потенциальной зоны смятия обсадных колонн: Патент № 2692389 С1 Российская Федерация, МПК E21B 47/00. № 2018133183: заявл. 18.09.2018; опубл. 24.06.2019 / Г. М. Толкачев, А. Г. Вахромеев, А. С. Козлов [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук.

22. Толкачев Г.М., Шилов А.М., Козлов А.С. и др. Требования к тампонажному раствору-камню для цементирования обсадных колонн в добывающих скважинах Ковыктинского ГКМ // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2007. № 10. С. 71–72.

КОМПЛЕКСНАЯ ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТНОГО И ПОДЗЕМНОГО СТОКА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ GeRa

Смирнов К.Д.¹, Новиков К.А.², Капырин И.В.²

¹*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва,
smirnov@ibrae.ac.ru*

²*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва*

Аннотация. В докладе рассмотрена комплексная сопряженная модель подземной фильтрации и поверхностного стока, реализованная в коде GeRa. Она основана на уравнении Ричардса для описания динамики подземных вод и аппроксимации диффузионной волны уравнений мелкой воды для поверхностных вод. Для расчета потока воды между поверхностью и подземным слоем используется выражение первого порядка (first-order exchange), в котором величина потока пропорциональна разнице напора воды в данных областях. Рассмотрен верификационный тест, показывающий работоспособность модели.

Ключевые слова: *подземные воды, поверхностный сток, взаимосвязь подземных и поверхностных вод, численное моделирование, комплексная фильтрационная модель*

Abstract. We present a mathematical model for simulating coupled surface-subsurface water flow implemented in the GeRa software. The model employs the Richards equation for groundwater flow and the diffusion wave approximation for surface runoff. Surface-subsurface coupling is implemented using the first-order exchange approach, where the flow rate is proportional to the hydraulic head difference between these domains. A verification test demonstrating the model's functionality is discussed.

Keywords: *groundwater, surface runoff, surface-subsurface coupling, numerical simulation, integrated hydrologic modeling*

Процессы взаимодействия подземных и поверхностных вод, связывающих две ветви геогидрологического цикла круговорота воды, являются основополагающими в гидрогеологии. Водообмен между подземными и поверхностными водами происходит в условиях их тесного взаимовлияния. Гидрологический режим водотока влияет на расход взаимодействия подземных и поверхностных вод (ППВ). Расчетная гидрогеодинамическая схематизация такого взаимовлияния предусматривает два принципиально различных случая:

- 1) независимый от подземных вод гидрологический режим водотока;
- 2) зависимый гидрологический режим, который формируется, в том числе, и за счет притока – оттока подземных вод.

Независимый гидрологический режим является упрощением природных условий, при котором изменение расхода взаимодействия ППВ не влияет на расход водотока. Данный тип схематизации наиболее популярен при моделировании подземных вод и правомерен в условиях, когда уровень поверхностных вод определяется в большей степени за счет климатических факторов и питания от поверхностных источников нежели от подземных. Уровень поверхностных вод в таком допущении является режимобразующим для подземных вод. Процесс взаимосвязи ППВ в данном случае определяется независимым уровнем водотока (постоянный или заданный через расписание) и его шириной, а также параметрами донных отложений.

Зависимый гидрологический режим моделирования взаимосвязи ППВ подразумевает сопряжение гидрогеодинамической модели подземных вод и моделей формирования гидрологического режима водотока, которые обладают определенными различиями. Данный тип схематизации подразумевает взаимовлияние ППВ, когда режим поверхностных вод, помимо климатических факторов, формируется за счет взаимодействия с подземными водами [1].

В данной работе представлена комплексная трехмерная модель подземного и поверхностного стока, которая реализована в отечественном программном комплексе GeRa [2]. Модель совместных процессов динамики поверхностных и подземных вод состоит из трех основных компонентов: 3D модель подземной фильтрации, 2D модель поверхностного стока и 1D модель поверхностного стока в одномерных гидрологических объектах, которые сопряжены за счет модификаций уравнений соответствующих моделей.

Для моделирования подземной фильтрации используется уравнение Ричардса:

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} - \nabla \cdot (K(h) \nabla (h + z)) = q, \quad (1)$$

где θ – объемное влагосодержание, t – время, (Т), h – высота (давление) всасывания, (L), $K(h)$ – коэффициент фильтрации, (LT⁻¹), z – вертикальная координата, (L), q – объемный расход источников или стоков, (T⁻¹).

Моделирование поверхностного стока в двумерном и одномерном случае осуществляется при помощи аппроксимации диффузионной волны для уравнений мелкой воды. Для двумерных областей используется следующее уравнение:

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} - \nabla \cdot (K_s \nabla H_s) = q_s - q_{ss},$$

$$K_s = \frac{h_s^{5/3}}{\nu \sqrt{|\nabla H_s|}}, \quad (2)$$

где h_s – глубина поверхностных вод, $H_s = h_s + z$ – уровень воды, ν – коэффициент шероховатости Мэннинга, q_s – интенсивность осадков, q_{ss} – поток между поверхностью и подземным слоем.

В одномерном случае в предположении прямоугольной формы канала аппроксимация диффузионной волны для уравнений мелкой воды принимает следующий вид:

$$\frac{\partial (wh_c)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{wh_c}{\nu} \frac{h_c w}{w + 2h_c} \sqrt{\left| \frac{\partial H_c}{\partial s} \right|} \right) = q_s - q_{ss} + q_{sc}, \quad (3)$$

где h_c – глубина поверхностных вод, $H_c = h_c + z$ – уровень воды, w – ширина канала, q_{sc} – поток между двумерной и одномерной областью.

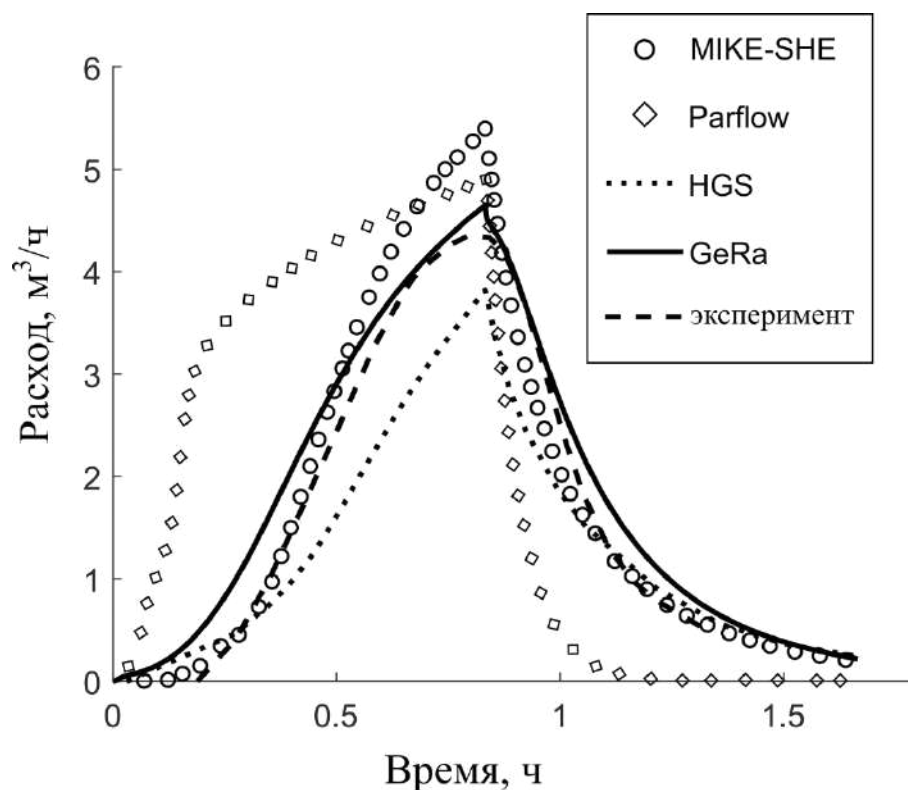
Сопряжение модели поверхностного стока и модели подземной фильтрации, а также двумерной и одномерной области поверхности осуществляется за счет оценки потока между областями.

Для параметризации двумерной модели поверхностного стока используется специальное граничное условие "Поверхностный сток" для верхней границы расчетной области. Это условие позволяет задать количество осадков, поступающих на верхнюю границу модели (L/T), мощность донных отложений (L), коэффициент фильтрации этих отложений (L/T) и коэффициент шероховатости Мэннинга (TL^{-1/3}).

Одномерная модель поверхностного стока задается с помощью ломаных линий, представляющих русла рек, в которых выделяются опорные точки для задания параметров. Эти параметры затем интерполируются на сетку модели. В опорных точках задаются коэффициент фильтрации донных отложений, мощность донных отложений, ширина реки, коэффициент шероховатости Мэннинга и коэффициент расхода водослива (L²/T).

Таким образом, часть заданных осадков проникает в подземные горизонты, в то время как остальная часть формирует поверхностный сток, который описывается двухмерными и одномерными потоками. Одномерные потоки моделируются по руслам рек и позволяют получить модельные расходы воды, аналогичные данным измерений расхода рек на гидропостах, которые могут быть использованы для калибровки модели.

Работоспособность данной модели продемонстрирована на верификационном тесте, в котором моделируется натурный эксперимент на искусственном рельефе, состоящем из канала длиной около 150 м и берегов [3]. В эксперименте симулируются осадки (орошение) в течение 50 мин, после чего осадки отсутствуют. В течение 100 мин на нижней стороне канала измеряется расход воды. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными и с результатами других симуляторов представлено на рисунке.



Сравнение результатов моделирования расхода воды с помощью кода GeRa с экспериментальными данными и результатами других симуляторов.

Представленная комплексная модель подземного и поверхностного стока позволяет точнее воспроизводить часть гидрологических процессов, которые могут оказывать существенное влияние на подземные воды. Данная модель может быть полезна как для оценки запасов подземных вод, так и для оценки безопасности объектов атомной отрасли.

Список литературы

1. Гриневский С.О. Гидрогеодинамическое моделирование взаимодействия подземных и поверхностных вод, М.: ИНФРА-М, 2012.
2. Капырин И.В. Расчетные коды для гидрогеологического моделирования в задачах оценки безопасности ОИАЭ // Радиоактивные отходы. 2022. № 2(19). С.105–115.
3. Kollet S., et al. The integrated hydrologic model intercomparison project, ih-mip2: A second set of benchmark results to diagnose integrated hydrology and feedbacks // Water Resources Research. 2017. 53 (1), 867–890.

IX. ПОДЗЕМНАЯ ГИДРОСФЕРА ГЛАЗАМИ МОЛОДЫХ ГИДРОГЕОЛОГОВ

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РАССОЛАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗНЫХ ВАРИАНТОВ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА

Горбунова М.П.^{1,3}, Пашкова Г.В.^{1,3}, Финкельштейн А.Л.^{2,3}

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, gorbunova.mari007@gmail.com

²Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск

³Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Исследована возможность применения двух вариантов рентгенофлуоресцентного анализа для определения основных элементов (Na, Mg, Cl, K, Ca, Br, Sr) в высокоминерализованных хлоридных рассолах. С использованием образцов, состав которых определен с помощью классических химических методик, выбраны оптимальные градуировочные функции для энергодисперсионного спектрометра с традиционной геометрией (X-Supreme 8000) и спектрометра с полным внешним отражением (S2 PICOFOX). Для контрольных проб наблюдалось хорошее согласие между результатами, полученными разными методами.

Ключевые слова: рассолы, химический анализ, рентгенофлуоресцентный анализ

Abstract. The applicability of two variants of X-ray fluorescence analysis (XRF) for the determination of major elements (Na, Mg, Cl, K, Ca, Br, Sr) in highly mineralized chloride brines was investigated. Using samples with compositions determined by classical chemical methods, optimal calibration functions were selected for an energy-dispersive X-ray spectrometer with traditional geometry (X-Supreme 8000) and a total reflection X-ray fluorescence spectrometer (S2 PICOFOX). Good agreement was observed between the results obtained by different methods for control samples.

Keywords: brines, chemical analysis, X-ray fluorescence analysis

Рассолы являются высокоминерализованными природными водами с общей минерализацией 50–400 г/дм³ и выше. Для определения содержания основных компонентов (ионов) в природных водах традиционно используются методы классической «мокрой» химии – весовые, объемные, пламенно-фотометрические и др. [1]. Методики химического анализа рассолов, как правило, длительны и трудоемки. Современные инструментальные спектральные методы позволяют проводить экспрессный многоэлементный анализ. Например, для одновременного определения макрокомпонентов в рассолах получил распространение метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС ИСП).

В данной работе рассмотрена возможность определения состава (Na, Mg, Cl, K, Ca, Br, Sr) хлоридных рассолов с использованием рентгенофлуоресцентного метода анализа (РФА).

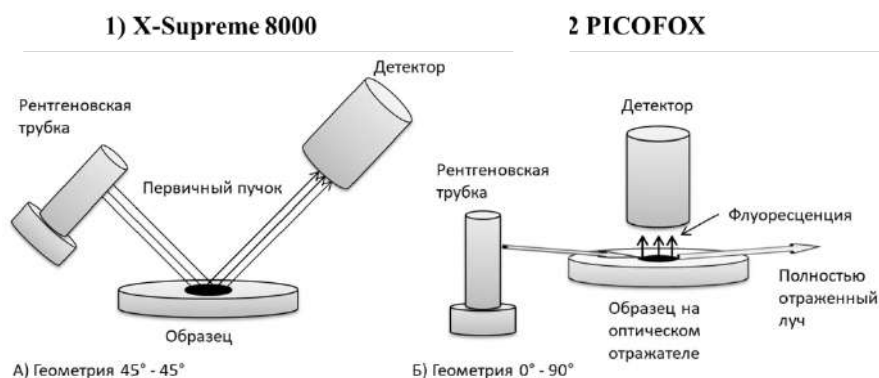
Для проведения методических исследований выбраны девять образцов рассолов из Ангара-Ленского бассейна, которые были изучены с помощью методик химического анализа, применяемых в лаборатории гидрогеологии ИЗК СО РАН. Для определения суммы ионов кальция (Ca²⁺) и магния (Mg²⁺) использовали титрование Трилоном Б с индикатором «Хром кислотный темно-синий». Определение ионов кальция (Ca²⁺) проводили с использованием индикатора кальцеина титрованием Трилоном Б. Для определения ионов хлора (Cl⁻) применяли аргентометрическое титрование с хроматом калия. Содержание ионов рубидия (Rb), калия (K⁺), натрия (Na⁺) и стронция (Sr²⁺) определяли спектрометрическим методом в режиме атомной эмиссии на приборе Agilent 200 Series AA. Определение ионов брома (Br⁻) проводили гипохлоритным йодометрическим методом. Описание образцов приведено в таблице. Диапазоны содержаний рассматриваемых элементов составили (г/дм³): Na – 1.86–19.48; Ca – 13.02–138.49; Mg – 3.88–53.07; Cl – 48.45–373.44; K – 1.29–14.08; Br – 6.01–12.88; Sr – 0.01–6.86.

Рентгенофлуоресцентный анализ проводили с использованием двух настольных энергодисперсионных спектрометров, отличающихся геометрией возбуждения и регистрации характеристического рентгеновского излучения, – X-Supreme 8000 (Hitachi, Китай), установленного в ЦКП «Изотопно-геохимические исследования» ИГХ СО РАН»; S2 PICOFOX (Bruker, Германия), установленного в ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН.

Характеристика проб рассолов

№ пробы	Минерализация, г/дм ³	Тип рассола по минерализации [2]	Содержание макрокомпонентов, г/дм ³					Плотность, г/см ³	pH
			Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻		
1	558.54	Предельно насыщенный	131.77	42.81	2.15	4.47	362.15	1.392	3.50
2	470.49	Весьма крепкий	78.94	48.64	5.88	14.08	310.49	1.338	4.50
3	461.23	Весьма крепкий	123.95	17.87	5.35	11.04	295.84	1.327	4.60
4	445.15	Весьма крепкий	73.84	53.07	3.18	2.38	298.69	1.327	2.90
5	564.92	Предельно насыщенный	137.14	42.28	1.86	2.48	368.84	1.397	3.70
6	570.81	Предельно насыщенный	138.49	42.22	1.91	2.63	373.44	1.400	3.60
7	75.38	Слабый	13.01	3.88	8.24	1.28	48.44	1.055	6.30
8	213.77	Крепкий	45.73	8.04	14.02	8.79	136.64	1.157	5.95
9	304.44	Крепкий	65.41	12.76	19.48	12.82	193.53	1.225	5.40

Основными частями обоих спектрометров являются рентгеновская трубка и кремниевый дрейфовый детектор (SDD), которые расположены относительно образца под разными углами (рисунок). Энергодисперсионный спектрометр X-Supreme 8000 (РФА ЭД) имеет традиционную геометрию ~ 45/45°. Ключевой особенностью рентгеновского спектрометра с полным внешним отражением (РФА-ПВО) S2 PICOFOX является конфигурация: угол падения первичного излучения ~0.1° и угол отбора флуоресценции – 90°.



Схемы рентгенофлуоресцентных спектрометров.

Спектрометр X-Supreme 8000 оснащен рентгеновской трубкой с вольфрамовым анодом мощностью до 3 Вт, с максимальным ускоряющим напряжением до 30 кВ. Спектрометр поддерживает режим заполнения камеры образцов гелием, обеспечивая измерение характеристических линий элементов от Na (NaK α , 1.041 кэВ). Экспозиция измерения одной пробы составляла 150 с.

Пробу объемом 10 мл заливали в кювету для жидкости с дном из полипропиленовой пленки толщиной 4 мкм. Такой объем пробы обеспечивает насыщенный слой, соответствующий поглощению 99 % анализируемого излучения для CaK α -линии и элементов с меньшим атомным номером. Для аналитических линий Br и Sr насыщенный

слой не обеспечивается и это приводит к необходимости дозировать фиксированный объем пробы.

Определены оптимальные градуировочные уравнения, которые позволяют уменьшить погрешность определения вследствие учета межэлементных влияний. Относительное стандартное отклонение градуировочных характеристик РФА ЭД для рассматриваемых диапазонов содержаний элементов составили (%): Na – 18; Mg – 3.5; Cl – 2.3; K – 9.7; Ca – 5.4; Br – 5.8; Sr – 3.7. Полученные погрешности РФА ЭД были сопоставлены с показателями точности классических методов, представленных в ПНД Ф(Природоохранные нормативные документы федеральные) [3–5] для природных вод. Относительные стандартные отклонения градуировочных характеристик РФА ЭД при определении элементов Mg, Cl, Ca, K, Br, Sr сопоставимы с показателями точности классических методов. Погрешность определения Na больше в сравнении с классическими методами анализа, что обусловлено низкой энергией аналитической линии (1.041 кэВ) вблизи нижнего предела энергии рентгеновского излучения, регистрируемого полупроводниковым детектором (≈ 1 кэВ).

На спектрометре S2 PICOFOX в качестве источника рентгеновского излучения используется рентгеновская трубка с молибденовым анодом с максимальной мощностью 50 Вт и максимальным током 750 мА. Все измерения осуществлялись при рабочем напряжении 40 кВ и токе 400 мкА. Спектрометр работает в воздушном режиме, поэтому из-за поглощения в воздухе затруднено определение Na и Mg. Экспозиция измерения одной пробы составляла 500 с.

Для приготовления излучателя к РФА ПВО необходимо нанести и высушить аликвоту раствора (10 мкл) в виде тонкого слоя на кварцевой подложке-отражателе. Рассолы являются сильно минерализованными водами, поэтому необходимо предварительное разбавление пробы для снижения содержания солей. Сравнение разных способов разбавления позволило сделать вывод, что при определении макроэлементов (K, Ca, Cl, Br, Sr) в рассолах методом РФА ПВО необходимо разбавление не менее чем в 100 раз. В каждую пробу перед разбавлением добавляли раствор внутреннего стандарта (раствор $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3$). Результаты, рассчитанные способом внутреннего стандарта, корректировали с помощью корреляционных зависимостей.

Для оценки правильности РФА выбрали две контрольные пробы. Полученные на спектрометрах X-Supreme 8000 и S2 PICOFOX результаты РФА хорошо согласуются с результатами химического анализа.

Таким образом, результаты исследования подтвердили возможность определения в рассолах элементов – Na, Mg, Cl, K, Ca, Br, Sr на РФА ЭД спектрометре X-Supreme 8000 и Cl, K, Ca, Br, Sr на РФА-ПВО спектрометре S2 PICOFOX. Основные преимущества РФА: простая пробоподготовка, многоэлементность, экспрессность, минимальные затраты на реактивы. Ограничением РФА является необходимость наличия градуировочных образцов, состав которых предварительно определен классическим химическим анализом.

Список литературы

1. Методы анализа природных вод // А.А. Резников, Е.П. Муликовская, И.Ю. Соколов. Изд. 3-е, переработ. и доп. М.: Изд-во Недра, 1970. 488 с.
2. Пиннекер Е.В. Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна:(закономерности размещения, состав, динамика, формирование и использование). М.: Наука, 1966.
3. Методика измерений массовой концентрации хлорид-ионов в пробах питьевых, природных (поверхностных и подземных) и сточных вод меркуриметрическим методом. ПНД Ф 14.1:2:3:4.111-97. М., 2020. 23 с.
4. Методика измерений массовых концентраций магния, кальция, стронция в пробах питьевых, природных и сточных вод пламенным атомно-абсорбционным методом. ПНД Ф 14.1:2:4.137-98. М., 2017. 21 с.
5. Методика измерений массовых концентраций натрия, калия, лития, стронция в пробах питьевых, природных и сточных вод методом пламенно-эмиссионной спектроскопии. ПНД Ф 14.1:2:4.138-98. М., 2017. 22 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ 30-ЛЕТНЕГО МОНИТОРИНГА ВЛИЯНИЯ СИСТЕМЫ ОБРАТНОЙ ЗАКАЧКИ НА ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ МИРНИНСКОГО РАЙОНА (1990–2022 ГГ.)

Дабу Н.¹, Ильин А.В.², Абрамов В.Ю.³

¹ Ботубинская ГРП Вилуйской ГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, natandabou@gmail.com

² АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный

³ Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Москва

Аннотация. Представлены результаты 30-летнего (1990–2022 гг.) мониторинга влияния обратной закачки дренажных рассолов на подземные воды метегеро-ичерского водоносного комплекса (МИВК) в районе месторождения трубки Мир. Установлено устойчивое повышение минерализации в зоне закачки и южном направлении – к депрессионной воронке. Распространение рассолов на север ограничивается Восточным разломом, выступающим гидрогеологическим барьером. Техногенное воздействие носит локальный характер при сохранении устойчивости регионального гидрохимического фона МИВК.

Ключевые слова: метегеро-ичерский водоносный комплекс, обратная закачка, трубка Мир, криолитозона, тектонические нарушения

Abstract. This study presents the results of a 30-year monitoring program (1990–2022) assessing the impact of drainage brine reinjection on groundwater within the Metegero–Ichersky aquifer system (MIAS) in the vicinity of the Mir kimberlite pipe. A persistent increase in groundwater mineralization has been identified in the reinjection zone and southward toward the depression cone. Northward migration of brines is constrained by the Eastern Fault, which functions as a hydrogeological barrier. Overall, the technogenic impact remains localized, while the regional hydrogeochemical background of the MIAS remains stable.

Keywords: Metegero–Ichersky aquifer system, reinjection, Mir kimberlite pipe, permafrost zone, tectonic disturbances.

Метегеро-ичерский водоносный комплекс (МИВК) – главный источник подземных вод для карьера и рудника «Мир» [2]. С 1993 по 2017 г. работала система обратной закачки дренажных рассолов на участке Тымтайдах [1]. Длительное техногенное воздействие сформировало сложную гидродинамическую и гидрохимическую обстановку. Оценка распространения рассолов и влияния тектонических нарушений важна для прогноза состояния недр и планирования природоохранных мер.

Цель работы – выявление закономерностей изменения минерализации подземных вод МИВК под влиянием системы обратной закачки по данным многолетнего мониторинга (1990–2022 гг.).

Объект исследования – надсолевой МИВК, представленный восемью коллекторами общей мощностью 48–78 м. Водовмещающие породы – трещиноватые доломиты и известняки. Подземные воды – хлоридные натриевые рассолы с минерализацией от 30–50 г/дм³ в кровле до 320 г/дм³ в подошве (в равновесии с галитом) [3].

Участок обратной закачки расположен в 8 км к северо-западу от карьера «Мир», за пределами Восточного разлома. Закачка осуществлялась через скважины № 9вн, 10вн, 11вн в режиме свободного налива. Закачиваемые воды – смесь дренажных рассолов карьера, паводковых и атмосферных вод, прошедших накопление в рассолонакопителе «Тымтайдах» (объем 12 млн м³) [2].

Анализ многолетних рядов (1990–2022 гг.) данных химического состава подземных вод по сети наблюдательных скважин МИВК, расположенных на различном удалении и в разных направлениях от участка закачки. Оценивалась динамика общей минерализации, ее минимальные, максимальные и средние значения.

Результаты исследования.

1. В наблюдательных скважинах № 1н, 2н и 4н в зоне закачки отмечен устойчивый рост минерализации в среднем с 65 г/дм³ (1990 г.) до 104 г/дм³ (2022 г.), при максимумах до 303 г/дм³ и минимумах 40–52 г/дм³. Рост обусловлен концентрированием солей (испарение, криогенное концентрирование, сброс опресненного слоя и сокращение притока пресных

вод). Восточный разлом не является гидрохимической границей, различий минерализации по его сторонам не выявлено.

2. Наиболее заметные изменения фиксируются южнее и юго-восточнее участка закачки, в сторону депрессионной воронки карьера. В скважине № 9н отмечен устойчивый рост минерализации, в скважинах № 10н и 19н – повышение с 89 до 120 г/дм³, что указывает на формирование возвратного потока закачиваемых рассолов. В скважинах № 102 и 108 наблюдаются повышенные значения, тогда как скважина № 111 характеризуется стабильно низкой минерализацией, вероятно, из-за блоковой изоляции. Южное направление наиболее чувствительно к техногенному воздействию, что согласуется с региональным подземным стоком и формой депрессионной воронки (рисунок).

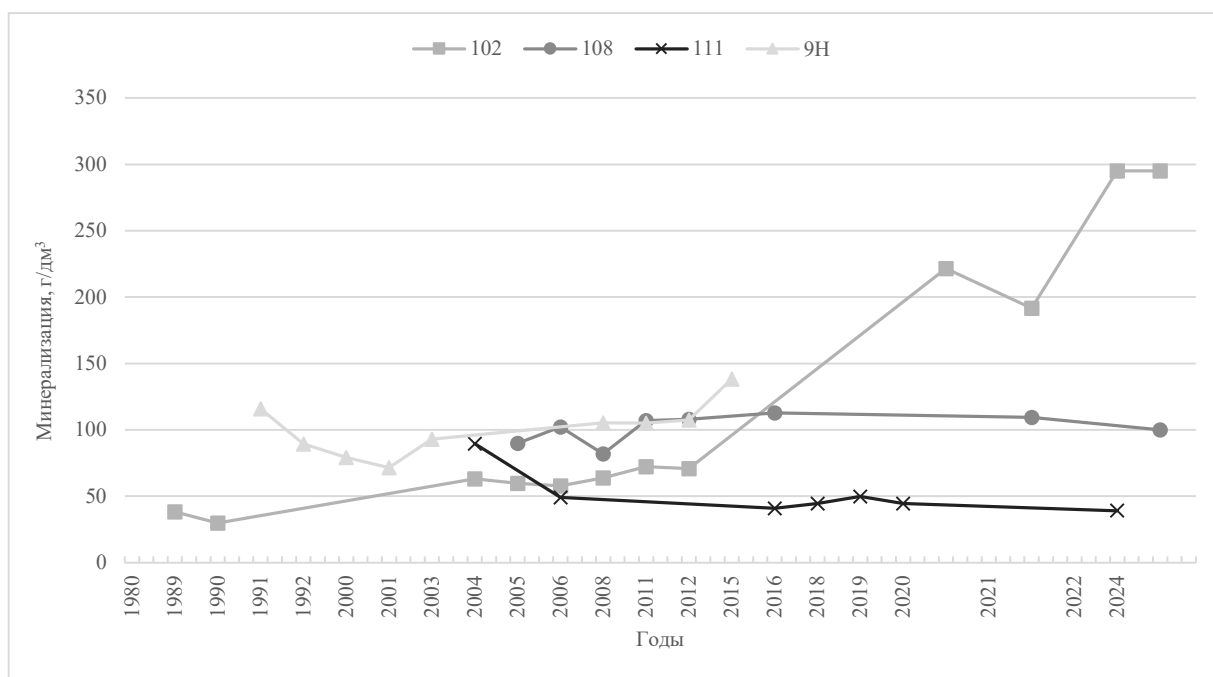


График изменения минерализации подземных вод в южной части участка закачки за период 1989–2024 гг.

3. В северной части района (скв. № 7н, 16н, 17н) существенных изменений минерализации не выявлено, значения стабильны в диапазоне 109–185 г/дм³ (макс. 232–236 г/дм³, мин. 68–147 г/дм³). Динамика отсутствует, что указывает на роль Восточного разлома как гидродинамического барьера, ограничивающего распространение закачиваемых рассолов.

4. На востоке от участка закачки динамика минерализации разнонаправленная, в скважине № 11н наблюдается рост, в скважине № 12н – снижение. Это связано с неоднородностью коллекторов и различиями гидравлической связи. В скважине № 549 (27 км) минерализация стабильно высокая (277–330 г/дм³), не зависит от режима закачки и сформирована региональными факторами.

5. Восточный разлом на севере – гидродинамический барьер, в центре гидрохимическая граница отсутствует, на юге миграция ограничена частично. Центральный разлом существенной изолирующей роли не играет (минерализация сопоставима по обе стороны). Таким образом, тектонические нарушения выступают преимущественно как гидродинамические барьеры, но не формируют устойчивых гидрохимических границ.

Выводы.

1. Система обратной закачки дренажных вод оказывает локальное воздействие на МИВК, выражающееся в устойчивом повышении минерализации в зоне закачки и на прилегающих участках.

2. Основное направление распространения техногенных рассолов — южное и юго-западное, что соответствует направленности фильтрационных потоков и влиянию депрессионной воронки карьера.

3. Северное направление экранируется Восточным разломом; значимых изменений гидрохимического режима здесь не зафиксировано.

4. На удалении более 25 км влияние системы закачки не прослеживается; состав вод полностью контролируется природными геолого-гидрогеохимическими факторами.

5. Тектонические нарушения выполняют неоднозначную роль: они могут быть гидродинамическими барьерами, но не формируют устойчивых гидрохимических границ.

6. Многолетний мониторинг подтверждает, что, несмотря на длительную техногенную нагрузку, региональный гидрохимический фон МИВК остается устойчивым. Трансформация состава вод носит локальный характер и ограничена гидродинамически связанной зоной.

Список литературы

1. Белова А.С., Ильин А.В. Исследования химического состава подземных вод в районе рудника «Мир» // Труды VII Всероссийского научного молодежного геокриологического форума «Актуальные проблемы и перспективы развития геокриологии». Якутск: Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2023. С. 45–48.

2. Иост Н.А. Отчет по комплексному анализу работы системы обратной закачки дренажных вод карьера Мир за период 1990–2014 гг., 2015. 311 с.

3. Янников А.М. Гидрогеология Мирнинского кимберлитового поля. Мирный: Изд-во ЗЯНЦ/ЯНА, 2021. 240 с.

ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ И ПАЛЕОТЕКТОНИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ АПТ-АЛЬБ-СЕНОМАНСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ В ПРЕДЕЛАХ ВАРЬЕГАНСКОГО МЕГАВАЛА

Касимов Ж.Д.^{1,2}, Трифонов Н.С.², Кудряшова Л.К.^{1,2}

¹Томский политехнический университет, Томск, zdk2@tpu.ru

²ООО «СахалинНИПИ нефти и газа», Томск

Аннотация. Активное использование апт-альб-сеноманского водоносного комплекса в пределах Западно-Сибирского артезианского бассейна (в том числе на Варьеганском мегавале) в качестве источника технических вод и объекта размещения излишков попутных вод требует детального изучения геолого-гидрогеологического строения комплекса. На основе палеогеографического анализа отложений покурской свиты установлено, что в южной части Варьеганского мегавала апт-альб-сеноманский водоносный комплекс накапливался в пределах прибрежной равнины, временами заливавшейся морем, для которой характерно ритмичное чередование коллекторов и флюидоупоров. В ходе палеотектонических реконструкций также выявлено конседиментационное формирование куполовидных структур, что указывает на высокую вероятность существования единой гидродинамически взаимосвязанной системы ААС ВК в пределах всего южного крыла мегавала.

Ключевые слова: апт-альб-сеноманский водоносный комплекс, палеотектонические реконструкции, палеогеографический анализ, Варьеганский мегавал, покурская свита

Abstract. The extensive use of the Aptian-Albian-Cenomanian aquifer system within the West Siberian Artesian Basin (including the Varyogansky Megaswell) as a source of technical water and a disposal horizon for excess produced water requires a detailed study of its hydrogeological aspects. Paleogeographic analysis of the Pokur Formation deposits established that the Aptian-Albian-Cenomanian aquifer system in the southern part of the Varyogansky Megaswell accumulated within a coastal plain that was periodically flooded by the sea, characterized by a rhythmic alternation of reservoirs and seals. Paleotectonic reconstructions also revealed syndepositional formation of dome-shaped structures, indicating a high probability of a common hydrodynamically interconnected part of the Aptian-Albian-Cenomanian aquifer system within the southern part of the megaswell.

Keywords: Aptian-Albian-Cenomanian aquifer system, paleogeographic analysis, paleotectonic reconstructions, Varyegansky megaswell, Pokur suite

Апт-альб-сеноманский водоносный комплекс (ААС ВК), представленный отложениями покурской свиты, играет ключевую роль в системе разработки практически всех месторождений углеводородов Западной Сибири, являясь не только источником подземных вод для системы поддержания пластового давления, но и объектом размещения излишков попутных вод. Однако особенности геологического строения месторождений оказывают влияние на проектирование водозаборных участков и участков размещения.

В данной работе рассмотрены два смежных месторождения (на расстоянии 9.2 км друг от друга), расположенные в пределах южной части Варьеганского мегавала (Ван-Еганское и Ай-Еганское).

Ван-Еганское нефтегазоконденсатное месторождение по геологическому строению относится к очень сложным, многопластовым, промышленная нефтегазоносность установлена в меловых и юрских отложениях. В изучаемой покурской свите выделено 24 продуктивных пласта. Наличие обособленных залежей УВ (пластово-сводовые, тектонически ограниченные, литологически экранированные, с отдельными ГНК/ГВК/ВНК) в пластах группы ПК Ван-Еганского месторождения свидетельствует об их гидродинамической изоляции друг от друга, что требует более детального и комплексного подхода к выбору как объектов добычи подземных вод, так и объектов размещения.

Ай-Еганское нефтегазоконденсатное месторождение также относится к очень сложным, многопластовым, и, несмотря на непосредственную близость расположения к Ван-Еганскому месторождению, покурская свита на Ай-Еганском месторождении не является нефтегазоносной. В связи с этим весь разрез ААС ВК используется исключительно в целях добычи подземных вод для ППД, а также размещения излишков попутных вод. При этом на отдельные объекты (пласты и группы пластов ПК₁₋₂₂) он не расчленялся. Однако возможное наличие гидродинамической связи между отложениями покурской свиты и схожесть

геологического строения на двух близлежащих месторождениях заставляет более тщательно подходить к выделению эксплуатационных объектов.

Целью работы является оценка выдержанности гидрогеологического строения ААС ВК в пределах южной части Варьеганского мегавала как по площади, так и по разрезу, на основе палеогеографических и палеотектонических реконструкций.

Анализ условий формирования отложений апт-альб-сеноманского водоносного комплекса проводился в несколько этапов.

На первом этапе исследования покурская свита по материалам ГИС была расчленена на три стратиграфических комплекса: «А» (сеноман, пласты ПК₁₋₆), «Б» (альб, пласты ПК₇₋₁₃) и «В» (апт, пласты ПК₁₄₋₂₂).

В рамках текущей работы использованы промысловые данные по 15 скважинам Ван-Еганского и Ай-Еганского месторождений, расположенных в пределах южной части Варьеганского мегавала. Отложения апт-альб-сеноманского водоносного комплекса в изучаемых скважинах прослеживаются на а.о. от –826.9 до –1626.4 м на Ван-Еганском и от –950.0 м до –1709.1 м – на Ай-Еганском месторождениях. Толщина отложений покурской свиты в среднем составляет 750–775 м. Также установлено, что покурская свита на Ван-Еганском месторождении гипсометрически расположена выше, чем на соседнем изучаемом месторождении на 82.7–123.1 м (таблица).

Разбивки стратиграфических комплексов
Ван-Еганского и Ай-Еганского месторождений

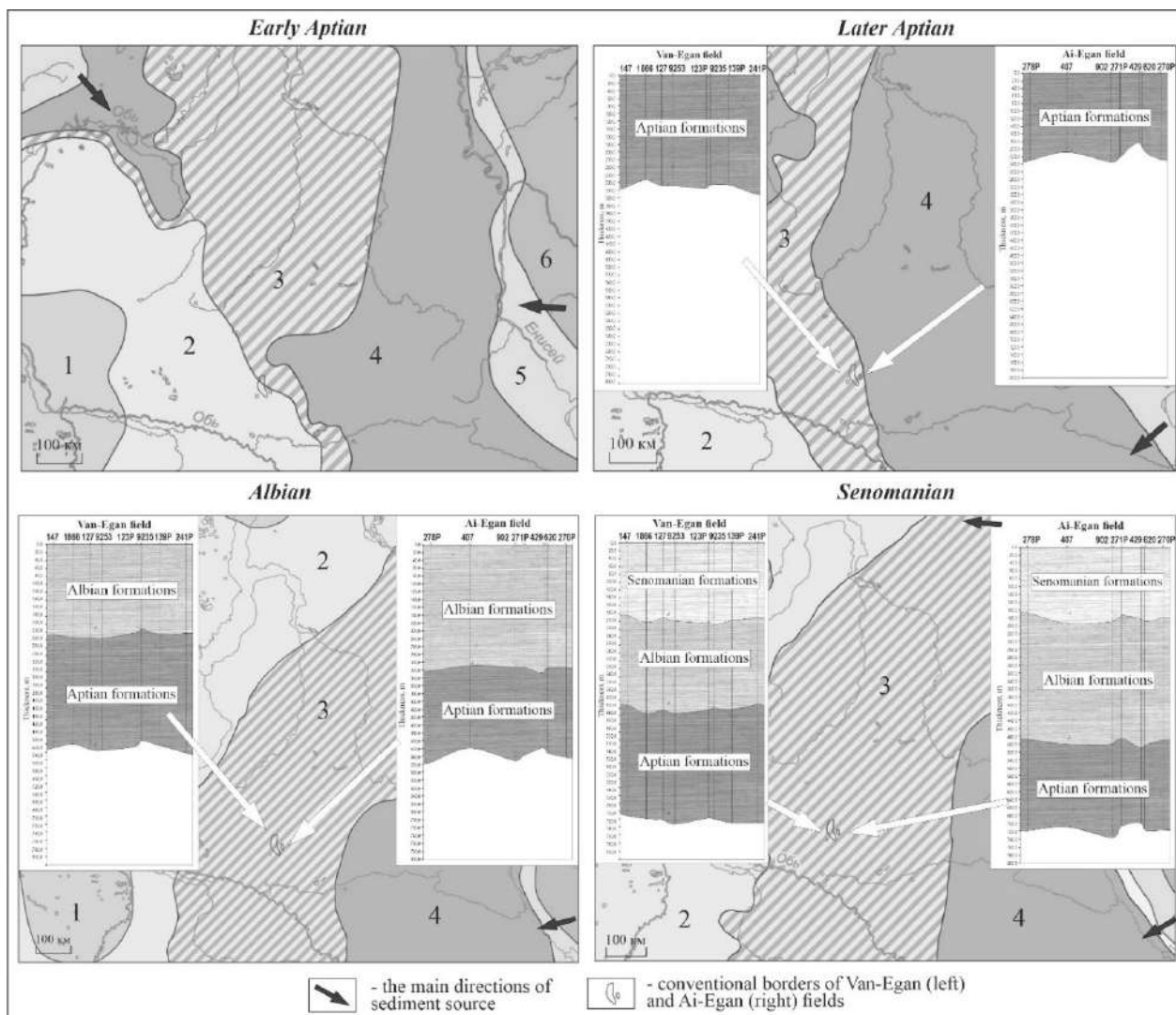
Участок недр	Номер скв.	Апт			Альб			Сеноман		
		А.о. кровли, м	А.о. подошвы, м	Вертикальная толщина, м	А.о. кровли, м	А.о. подошвы, м	Вертикальная толщина, м	А.о. кровли, м	А.о. подошвы, м	Вертикальная толщина, м
Ван-Еганский	147	–1264.6	–1554.8	290.2	–1024.8	–1255.6	230.8	–826.9	–1014.4	187.5
	1866	–1295.4	–1567.8	272.4	–1050.9	–1288.8	237.9	–840.0	–1046.0	206.0
	127	–1281.2	–1568.0	286.8	–1039.3	–1277.7	238.4	–836.2	–1031.2	195.0
	9253	–1283.9	–1571.3	287.4	–1038.9	–1279.0	240.1	–835.2	–1037.8	202.6
	123Р	–1296.6	–1588.4	291.8	–1067.5	–1292.1	224.6	–856.0	–1064.6	208.6
	9235	–1298.8	–1583.6	284.8	–1065.4	–1282.0	216.6	–848.9	–1061.8	212.9
	139Р	–1299.8	–1584.4	284.6	–1066.2	–1296.4	230.2	–862.6	–1064.7	202.1
	241Р	–1319.3	–1626.4	307.1	–1089.8	–1316.5	226.7	–894.2	–1086.9	192.7
Ай-Еганский	278Р	–1480.5	–1709.1	228.6	–1151.6	–1467.8	316.2	–984.2	–1148.8	164.6
	407	–1472.0	–1679.4	207.4	–1161.0	–1463.0	302.0	–965.8	–1157.0	191.2
	902	–1446.9	–1680.6	233.7	–1138.6	–1445.4	306.8	–950.0	–1136.0	186.0
	271Р	–1464.0	–1685.2	221.2	–1139.0	–1445.1	306.1	–959.3	–1131.2	171.9
	429	–1463.2	–1646.7	183.5	–1133.5	–1458.0	324.5	–953.9	–1133.0	179.1
	620	–1459.0	–1672.5	213.5	–1150.0	–1458.0	308.0	–961.9	–1149.1	187.2
	270Р	–1460.0	–1686.0	226.0	–1143.5	–1450.0	306.5	–958.5	–1134.2	175.7

Далее определялись палеогеографические обстановки по работам А.Э. Конторовича и др. [5]. В общем смысле палеогеографические реконструкции позволяют определить фациальные обстановки в какой-либо период геологического времени.

Анализ показал, что в апт-альб-сеноманское время изучаемая территория по большей части находилась в области прибрежной равнины, временами заливавшейся морем, что обусловило ритмичное чередование морских глинистых и континентальных песчано-алевритовых отложений, формирующих череду пластов-коллекторов и региональных флюидоупоров (рисунок) [5]. Результаты палеогеографического анализа подтверждаются

материалами лабораторных исследований керна, геофизическими исследованиями скважин, а также ранее проводимыми исследованиями, согласно которым покурская свита на изучаемых месторождениях сложена переслаиванием песчаников, алевролитов и глин с прослоями углистого материала [2].

Следующим этапом был проведен палеотектонический анализ, основанный на построении палеоструктурных профилей, для реконструкции истории развития структуры каждого отдельного комплекса в процессе его осадконакопления согласно общепринятой методике [3, 4]. В соответствии с принципом компенсации тектонического прогибания осадконакоплением за нулевую поверхность принималась кровля вышележащего горизонта.



Палеогеография Варьеганского мегавала в раннеапт-сеноманское время (под ред. Конторовича А.Э., 2014 г.) с палеоструктурными профилями формирования отложений ААС ВК Ван-Еганского и Ай-Еганского участка недр.

1–6 – палеогеографические области: области морского осадконакопления: 1 – море мелкое, 25–100 м; 2 – море мелкое, менее 25 м; области переходного осадконакопления: 3 – равнина прибрежная, временами заливавшаяся морем (осадки пойменные, озерно-болотные, русловые, дельтовые, береговых баров, пляжевые); 4 – равнина низменная, аккумулятивная (осадки русел, пойм, озер); 5 – равнина денудационно-аккумулятивная; области размыва: 6 – равнина возвышенная (денудационная суша).

Построенные авторами палеоструктурные профили по мощности комплексов «А», «Б» и «В» для обоих месторождений выявили конседиментационный характер формирования локальных поднятий (рисунок).

На Ван-Еганском месторождении куполовидные структуры проявились уже в апте (амплитуда до 25 м) в районе скважин № 1866, 9235 и 139Р. На протяжении альбского и сеноманского времени в результате тектонических движений положительная структура изменяла свою форму с сохранением амплитуды. На конец сеномана куполовидное поднятие наблюдалось в районе скважин № 147, 127 и 123Р с амплитудой до 25 м.

На Ай-Еганском месторождении положительная структура также фиксируется с аптского века. В это время наибольшей амплитудой характеризуется поднятие в районе скважин № 429 и 620, достигающее 45 м. В альбском веке положительная структура в районе скважин № 429 и 620 была частично компенсирована отрицательным прогибанием. В сеноманское время за счет позитивных тектонических движений наблюдаются куполовидные поднятия по всем трем комплексам в районе скважин № 271Р и 429 амплитудой до 30 м. Положительные прогибания, зафиксированные на палеоструктурных построениях, свидетельствуют о едином палеотектоническом режиме формирования в районе исследования в течение всего апт-альб-сеноманского времени.

Таким образом, в ходе исследования выявлено, что формирование положительных структур на Ван-Еганском и Ай-Еганском месторождениях происходило в один период (апт-альб-сеноманское время) в условиях единого палеотектонического режима. Палеогеографические реконструкции свидетельствуют о единых фациальных обстановках осадконакопления в области прибрежной равнины, временами заливавшейся морем, послужившей формированию ритмичного чередования континентальных песчано-алевролитовых отложений с морскими глинами.

Также следует отметить, что Ай-Еганское месторождение гипсометрически расположено ниже Ван-Еганского месторождения на 82.7–123.1 м, в процессе миграции УВ из наиболее погруженного Тюменского мегапрогиба в сторону Варьеганского мегавала оно, вероятно, послужило зоной транзита УВС и не аккумулировало в себе запасов нефти и газа, несмотря на сформировавшиеся в апт-альб-сеноманское время ловушки [1]. Наличие на Ван-Еганском месторождении промышленных залежей УВ во всем разрезе покурской свиты с различными отметками ГНК/ГВК/ВНК свидетельствует о качестве и латеральной выдержанности флюидоупоров и коллекторов на всем пути миграции, разделяющих толщу на отдельные изолированные объекты.

Таким образом, основываясь на совокупности вышеизложенных фактов, можно предположить, что разрез покурской свиты ААС ВК в пределах южной части Варьеганского мегавала является латерально гидродинамически связанной, но вертикально дифференцированной системой. Следовательно, ААС ВК в пределах южной части Варьеганского мегавала необходимо рассматривать в качестве отдельных самостоятельных эксплуатационных объектов (пласты ПК₁₋₂₂) для добычи технических вод и размещения попутных вод, что существенно повысит качество и достоверность определения расчетных фильтрационных параметров.

Список литературы

1. Атлас месторождений нефти и газа Ханты-Мансийского автономного округа-Югры. Тюмень–Ханты-Мансийск: ИздатНаукаСервис, 2013. Т. 1. 236 с.
2. Бетхер О.В., Афонин И.В., Ивлев Д.А. Литофациальный анализ и палеогеографические реконструкции верхнесеноманских отложений горизонта ПК₁₋₂ (покурская свита, Ван-Еганское месторождение, западная Сибирь) // Вестн. Том. гос. ун-та. 2014. № 386.
3. Мухин В.М. Методика палеотектонического анализа при нефтегазописковых работах: учебное пособие для студентов, обучающихся по специальностям "геология нефти и газа" и "геология и геохимия горючих ископаемых". Саратов: Наука, 2011. 71 с.
4. Нейман В.Б. Теория и методика палеотектонического анализа. М.: Недра, 1974. 80 с.
5. Конторович А.Э., Ершов С.В., Казаненков В.А. и др. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в меловом периоде // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 5-6. С. 745–776.

ФАКТОРЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА РОДНИКОВЫХ ВОД УРОЧИЩА ПЕСКИ (ЗАБАЙКАЛЬЕ): ОЦЕНКА ПО ДАННЫМ 2022–2025 ГГ. С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Паламарчук В.А.^{1,2}, Лебедева Л.С.³, Павлова Н.А.³, Шамов В.В.³

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, palamarchuk97@inbox.ru

²Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень

³Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова, Якутск

Аннотация. Методом факторного анализа выделены четыре геохимических фактора, определяющих состав вод родников урочища Пески (Чарская котловина, Забайкалье). Факторы 1 и 3 относятся к геологическим, они характеризуют особенности литологического состава водовмещающих пород и поступления ионов в раствор. Фактор 1 отражает выщелачивание кристаллических, метаморфических и интрузивных пород фундамента, продукты разрушения которых составляют флювиогляциальные отложения 2-го водоносного комплекса (ВК). Фактор 3 отражает гидролиз полевошпатовых эоловых песков 1-го ВК. Факторы 2 и 4 относятся к физическим, они характеризуют геохимический барьер, на котором происходит резкая смена гидрогеохимических условий миграции химических элементов. Фактор 2 соответствует нитрификации аммония глубинных вод при их длительном контакте в зоне смешения с метеорными водами 1-го ВК. Фактор 4 фиксирует вынос слабо трансформированных восстановленных вод в окислительную обстановку. Пространственная дифференциация химического состава родниковых вод в пределах урочища контролируется гипсометрическим положением выходов подземных вод, мерзлотными условиями, а также геолого-структурными особенностями водовмещающих отложений.

Ключевые слова: родники, криолитозона, песчаные массивы, гидрохимия, статистический анализ

Abstract. Using factor analysis, four geochemical factors controlling the chemical composition of spring waters in the Peski area (Chara Basin, Transbaikalia) were identified. Factors 1 and 3 are geological in nature, reflecting the lithological composition of the water-bearing rocks and the sources of ions entering the solution. Factor 1 reflects the leaching of crystalline, metamorphic, and intrusive basement rocks, whose weathering products constitute the fluvio-glacial deposits of the 2nd aquifer complex (AF). Factor 3 reflects the hydrolysis of feldspars in the aeolian sands of the 1st AF. Factors 2 and 4 are physical in nature and characterize the geochemical barrier where a sharp change in the hydrogeochemical migration conditions occurs. Factor 2 corresponds to the nitrification of ammonium from deep groundwater during prolonged contact in the mixing zone with meteoric waters of the 1st AF. Factor 4 indicates the discharge of weakly transformed reduced waters into an oxidizing environment. The spatial differentiation of the spring water chemistry within the study area is controlled by the hypsometric position of the discharge points, permafrost conditions, and the geological and structural features of the water-bearing deposits.

Keywords: springs, permafrost zone, sandy massifs, hydrochemistry, statistical analysis

Генезис химического состава подземных вод Чарской котловины (Забайкалье), как типичного межгорного рифтогенного прогиба в сплошной криолитозоне [7], представляет собой классический пример диффузной геохимической системы [3]. Экстремальные климатические и мерзлотные условия, наложенные на сложную геолого-тектоническую структуру региона, создают уникальную среду для формирования комплексных и динамичных взаимодействий в системе вода – порода. Это обуславливает необходимость применения статистических методов, направленных на исключение из анализа внутренних корреляций в многомерных массивах данных. Цель данной работы – выявление механизмов формирования химического состава родниковых вод урочища Пески (Забайкалье) на основе методов многомерной статистики.

Исследование основано на применении комплекса статистических методов к массиву гидрохимических данных, включающему 102 водные пробы, отобранные в летние периоды 2022–2025 гг., по 13 показателям: водородному показателю (pH), окислительно-восстановительному потенциалу (Eh), содержанию основных катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , NH_4^{+}) и анионов (HCO_3^{-} , SO_4^{2-} , Cl^{-} , NO_3^{-} , F^{-}), а также общей минерализации (TDS). Первичный анализ исходных данных (гистограммы, Q-Q графики) выявил их отклонение от нормального распределения, что обусловило использование непараметрических методов. Пространственная структура данных была проанализирована путем объединения родников в три группы в соответствии с их локализацией: в долине руч. Аленушка, в долине руч.

Песчаный и на периферии урочища Пески. Статистическая значимость различий химического состава между этими группами оценивалась с помощью попарного сравнения по критерию Манна – Уитни [6, 9]. С целью выявления и идентификации факторов, контролирующих формирование химического состава, был применен факторный анализ. Факторы извлекались методом главных компонент. Для достижения простой и интерпретируемой структуры полученные компоненты были подвергнуты варимакс-вращению [3]. Влияние выделенных факторов на различные группы родников оценивалось с помощью критерия Краскела – Уоллиса [6, 9].

Для урочища Пески характерно глубокое сезонное промерзание пород до 5–6 м. Многолетнемерзлые породы (ММП) развиты на периферии урочища, где в долинах ручьев Аленушка и Песчаный их мощность может достигать 35 м. В верхней части разреза урочища Пески выделяют два гидравлически связанных водоносных комплекса (ВК). Первый от поверхности ВК приурочен к толще современных эоловых (vQ) и верхнечетвертичных озерно-аллювиальных (alQ_{III}^2) отложений, представленных мелкозернистыми песками мощностью 30–35 м. Питание этого комплекса осуществляется атмосферными осадками в летнее время. Второй ВК развит в верхнечетвертичных флювиогляциальных отложениях (fQ_{III}^2). Водовмещающие породы представлены валунными галечниками, залегающими в интервале глубин от 35–80 до 75–120 м. Пьезометрический уровень вод ВК устанавливается выше поверхности земли (+5.25 м). Этот комплекс гидравлически связан с поверхностными водотоками через систему таликов, в том числе приуроченных к тектоническим разломам. Одним из потенциальных источников его питания, вероятно, являются ледниковые воды хребта Кодар [8].

Геохимический фон поверхностных вод Чарской котловины формируют ультрапресные (20–75 мг/дм³) нейтральные и слабокислые воды гидрокарбонатно-кальциевого состава. Ключевая региональная особенность – повышенные концентрации фтора [5] (в диапазоне 0.7–2.0 мг/дм³). Источником фтора служат кристаллические породы региона, в составе которых присутствуют акцессорные фторсодержащие минералы [1].

Родниковые воды урочища Пески имеют преимущественно гидрокарбонатно-магниево-кальциевый состав с диапазоном минерализации от 45 до 225 мг/дм³ и нейтрально-щелочную реакцию водной среды (рН 6.8–8.8). Значения Eh в диапазоне от +355 до +560 мВ характеризуют окислительную обстановку. Главной отличительной чертой является высокое и переменное содержание фтора (0.7–4.0 мг/дм³). В водах урочища фиксируются повышенные концентрации Mn (0.1–0.2 мг/дм³) и As (14–22 мкг/дм³). Содержание железа (0.5–3.0 мг/дм³) существенно возрастает на периферийных участках урочища. На восточной периферии урочища тип вод сменяется на гидрокарбонатно-натриево-магниевый, также отмечаются повышения концентраций хлор-иона (до 6 мг/дм³). Ионы Mg и Na также преобладают и в катионном составе некоторых родников руч. Аленушка, реже – руч. Песчаный, особенностью которых является небольшой дебит и залесенность родниковых долин.

Статистически значимые различия между тремя группами родников подтверждены критерием Манна – Уитни. Медианные концентрации ионов достоверно различаются в следующих парах:

- Руч. Аленушка – Руч. Песчаный: Различия характерны по Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , причем более высокие значения этих ионов зафиксированы в водах родников руч. Аленушка.
- Руч. Аленушка – Периферия: Различия наблюдаются по Ca^{2+} , SO_4^{2-} , F^- , с более высокими концентрациями этих ионов в водах родников руч. Аленушка.
- Руч. Песчаный – Периферия: Различия установлены по Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- . Более высокие содержания кальция и сульфатов характерны для родников руч. Песчаного, а магния, натрия, калия и хлора — для родников периферийной зоны.

Методом главных компонент выделены четыре фактора, объясняющие 78 % общей дисперсии данных (таблица).

Значения факторных нагрузок

Показатель	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
pH	0.362	-0.678	-0.019	0.171
Eh	-0.272	-0.628	0.071	0.532
Ca ²⁺	0.903	-0.059	-0.166	0.101
Mg ²⁺	0.784	0.088	0.444	-0.146
Na ⁺	0.357	0.083	0.860	0.030
K ⁺	0.061	-0.200	0.884	0.080
NH ₄ ⁺	0.107	0.014	0.062	0.908
HCO ₃ ⁻	0.950	0.014	0.250	-0.016
SO ₄ ²⁻	-0.255	-0.731	0.027	0.022
Cl ⁻	0.332	0.092	0.627	0.058
NO ₃ ⁻	-0.038	0.852	-0.040	0.154
Минерализация	0.945	0.019	0.280	0.019
F ⁻	0.702	0.141	0.150	0.357
Вклад факторов в общую дисперсию, %	38.37	18.00	12.12	9.24
Кумулятивный вклад факторов, %	38.37	56.37	68.49	77.73

Для фактора 1 установлены высокие положительные нагрузки по Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, TDS и F⁻. Эти переменные отражают геохимический фон природных вод котловины и доминируют в химическом составе подмерзлотных вод 2-го ВК. Флювиогляциальные отложения, вмещающие подземные воды комплекса, являются продуктом разрушения и переотложения кристаллических, метаморфических (сланцы, песчаники) и интрузивных (гранитоиды) пород фундамента [1]. Поступление Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, вероятно, обусловлено гидролизом алюмосиликатов и растворением карбонатного цемента песчаников. Повышенные содержания фтора (F⁻) связаны с выщелачиванием фторсодержащих минералов гранитоидов (апатит). Вклад этого фактора в формирование состава родниковых вод носит фоновый характер и проявляется во всех группах. Незначительное усиление фактора в долинах ручьев Аленушка и Песчаный обусловлено зонами трещиноватости и более низкими гипсометрическими отметками (727–750 м н.у.м.), способствующими разгрузке напорных вод 2-го ВК, обогащенных продуктами выветривания.

Фактор 2 характеризуется высокой положительной нагрузкой по NO₃⁻ и отрицательными нагрузками по SO₄²⁻, Eh. Это, вероятно, объясняется процессом нитрификации аммония, который контролируется окислительно-восстановительными условиями в зонах разгрузки. Источником аммония (NH₄⁺) служат подмерзлотные воды 2-го ВК, а кислородом, необходимым для окисления, обеспечивают инфильтрационные воды 1-го ВК. При смешении этих типов вод и достаточном времени контакта аммоний окисляется до NO₃⁻, что сопровождается потреблением кислорода (снижением Eh). Отрицательная связь с SO₄²⁻ объясняется тем, что процесс наиболее активен там, где доля метеорных вод 1-го ВК (основного источника сульфатов) минимальна, а роль глубинных вод 2-го ВК максимальна. Наиболее выражен фактор 2 в пробах из родников руч. Аленушка, что определяется мерзлотно-гидрогеологическими условиями участка. По-видимому, долина ручья отличается более суровыми мерзлотными условиями: значительная площадь и мощность ММП затрудняют водообмен и способствуют увеличению времени взаимодействия смешанных вод, что благоприятствует завершению нитрификации [2].

Фактор 3 (Na⁺, K⁺, Cl⁻) отражает процесс выщелачивания легкорастворимых соединений из эолово-аллювиальных отложений 1-го ВК при инфильтрационном питании. Источником Na⁺ и K⁺ служат полевые шпаты, доминирующие в минеральном составе эоловых песков урочища Пески [4], их гидролиз атмосферными водами обеспечивает поступление щелочных металлов в раствор. Максимальное влияние фактора 3 в периферийной группе родников, вероятно, определяется гипсометрическими условиями. Более высокие абсолютные отметки выходов подземных вод на периферии (745–766 м н.у.м.) ограничивают разгрузку напорных вод 2-го ВК. Доля их участия здесь минимальна, а

питание осуществляется преимущественно за счет инфильтрационных вод 1-го ВК Тест Краскела – Уоллиса подтверждает статистическую значимость этого распределения.

Фактор 4 ($\text{NH}_4^+ - \text{Eh}$) отражает геохимические особенности окислительно-восстановительных условий в зонах разгрузки. Парадоксальная положительная связь NH_4^+ и Eh объясняется тем, что высокий Eh характеризует окислительные условия самой зоны разгрузки, в которую поступает глубинная вода, а NH_4^+ сохраняется в пробе как еще не успевший окислиться реликтовый компонент. Данный фактор наиболее выражен в долине руч. Песчаного, где, согласно мерзлотно-гидрогеологической карте (ПГО Читагеология, 1976), сеть тектонических разломов развита шире, создавая каналы для разгрузки глубинных вод. В руч. Аленушка (замедленный водообмен) и на периферии (ограниченная разгрузка вод 2-го ВК) влияние фактора слабее.

Таким образом, на основе факторного анализа выявлены четыре основных фактора, контролирующих химический состав вод урочища Пески. Фактор 1 отражает выщелачивание кристаллических, метаморфических и интрузивных пород фундамента, продукты разрушения которых слагают флювиогляциальные отложения 2-го ВК. Его усиление в долинах ручьев Аленушка и Песчаный обусловлено низкими гипсометрическими отметками зон разгрузки и наличием тектонических разломов, обеспечивающих разгрузку напорных подмерзлотных вод. Фактор 2 соответствует нитрификации аммония глубинных вод при смешении с инфильтрационными. Преобладание фактора в родниках руч. Аленушка связано с более суровыми мерзлотными условиями. Фактор 3 отражает гидролиз полевошпатовых золотых песков 1-го ВК при инфильтрации атмосферных вод. Максимум на периферии обусловлен высокими гипсометрическими отметками, ограничивающими разгрузку глубинных вод 2-го ВК. Фактор 4 фиксирует вынос слабо трансформированных восстановительных вод в окислительную обстановку зон разгрузки. Его проявление в руч. Песчаный связано с сетью тектонических разломов, обеспечивающих быструю разгрузку вод 2-го ВК и консервацию в них аммония. Таким образом, дифференциация состава родников урочища Пески предопределена гипсометрией, тектоникой, мерзлотными условиями и литологическим составом водовмещающих отложений.

Исследование выполнено в рамках проекта НИОКТР №126020516689-6 «Подземные воды криолитозоны, особенности их взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами» (ИМЗ СО РАН). Авторы выражают благодарность сотрудникам Национального парка «Кодар», а также А.П. Гинзбургу и М.М. Данько за помощь в проведении полевых работ.

Список литературы

1. Абрамов Б.Н. Условия, источники образования и закономерности размещения благороднометалльного оруденения Кодаро-Удоканской зоны и средневитимского фрагмента Муйской зоны: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук: 25.00.11. Чита: ЧитГТУ, 2007. 394 с.
2. Анисимова Н.П., Павлова Н.А. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии. Новосибирск: Академическое издательство "Гео", 2014. 189 с.
3. Белонин М.Д., Голубева В.А., Скублов Г.Т. Факторный анализ в геологии. М.: Недра, 1982. 269 с.
4. Еникеев Ф.И. Песчаные массивы Чарской впадины (Северное Забайкалье) // Записки Забайкальского отделения Русского географического общества. Чита: Забайкальский государственный университет. 2019. С. 152–163.
5. Кашин В.К., Иванов Г.М. Фтор в природных водах Забайкалья // Водные ресурсы. 1999. № 4. С. 502–505.
6. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 813 с.
7. Несмеянов С.А., Сергеев Д.О., Воейкова О.А., Кулаков А.П. Неоструктурное районирование и опасные процессы в районе Чарской рифтовой впадины // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2024. № 4. С. 14–28.
8. Паламарчук В.А., Лебедева Л.С., Павлова Н.А., Гинзбург А.П. Гидрохимия родниковых вод центральной части Чарской котловины, Северное Забайкалье // Криосфера Земли. 2025. Т. XXIX. № 3. С. 18–30.
9. Солдатова Е.А., Иванова И.С., Колубаева Ю.В., Соколов Д.А. Особенности формирования химического состава поверхностных вод арктических территорий Западной Сибири // Геохимия. 2022. Т. 67, № 11. С. 1142–1156.

ОТСТОЙНИКИ КАРЬЕРНЫХ ВОД КАК ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНОЙ ГИДРОСФЕРЫ В КУЗБАССЕ

Пашагин А.В., Дутова Е.М., Людвиг В.М.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,
AndryuP@yandex.ru*

Аннотация. На основе мониторингового опыта анализируются данные гидрогеохимического состояния подземных вод в зонах влияния угледобывающих предприятий Кузбасса. Установлено, что опасным источником локального, но интенсивного загрязнения являются отстойники карьерных вод. В их акватории и в прилегающих наблюдательных скважинах фиксируются высокоминерализованные воды ($0.9\text{--}3.0\text{ г/дм}^3$) с повышенным содержанием сульфатов, натрия и азотистых соединений. В статье рассматриваются механизмы формирования загрязнения. В качестве ключевого вывода обосновывается необходимость совершенствования системы мониторинга подземных вод с переходом к динамической модели для минимизации экологических рисков в угледобывающих регионах.

Ключевые слова: Кузбасс, гидрогеохимия, сульфаты, отстойники, мониторинг

Abstract. Based on the monitoring experience, data on the hydrogeochemical state of groundwater in the zones of influence of Kuzbass coal mining enterprises are analyzed. It has been established that the sedimentation tanks of quarry waters are a dangerous source of local but intense pollution. Highly mineralized waters ($0.9\text{--}3\text{ g/L}$) with a high content of sulfates, sodium and nitrogenous compounds are recorded in their water area and in adjacent observation wells. The article discusses the mechanisms of pollution formation. As a key conclusion, the necessity of improving the groundwater monitoring system with the transition to a dynamic model is substantiated in order to minimize environmental risks in coal-mining regions.

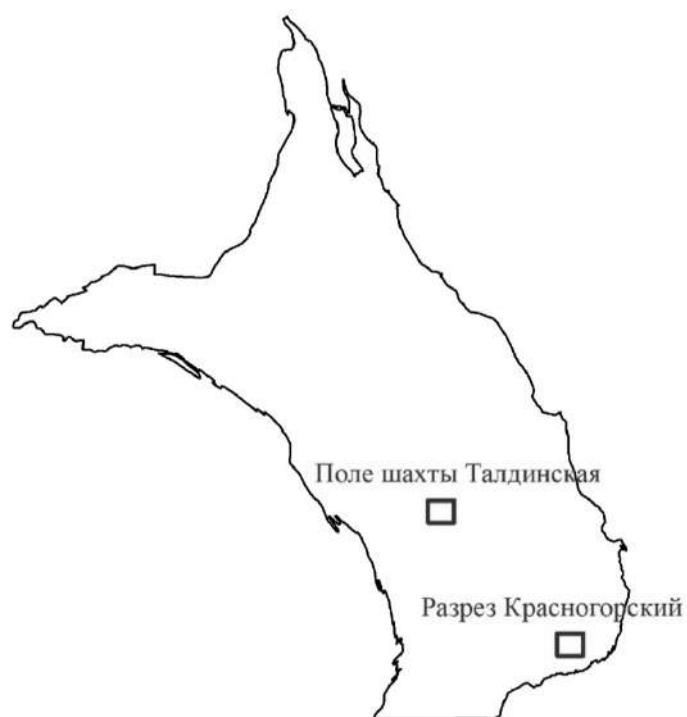
Keywords: Kuzbass, groundwater, hydrogeochemistry, sulfates, settling ponds, monitoring

Кузнецкий угольный бассейн (Кузбасс) – крупнейший промышленный регион России, где интенсивная добыча угля открытым и подземным способом оказывает многофакторное воздействие на геологическую среду, и прежде всего на гидрогеологическую обстановку. Технологический комплекс угледобычи включает вскрышные работы, дегазацию, осушение месторождений (водоотлив) и последующее хранение или сброс извлеченных шахтных и карьерных вод. Последний процесс является критически важным с экологической точки зрения, поскольку извлеченные воды, контактируя с горными породами и угольными пластами, формируют особые геохимические условия и, как следствие, специфический химический состав, становясь потенциальным источником загрязнения [2].

Система водоотлива на угледобывающих предприятиях формирует два основных вида воздействия на подземные воды: 1) изменение естественного гидродинамического режима (образование депрессионных воронок) и 2) химическое загрязнение в процессе последующего водоотведения дренажных вод. В процессе функционирования различных технологических объектов основными аккумуляторами и прямыми источниками загрязнения подземных вод выступают отстойники карьерных вод. Именно здесь происходит накопление загрязненных концентрированных вод и, при недостаточной гидроизоляции ложа отстойников, интенсивная их инфильтрация в водоносные горизонты.

В основу настоящего исследования положены фактические данные локального экологического мониторинга, проведенного на территориях действующих угледобывающих предприятий Кузбасса. Анализ охватывает разные периоды наблюдений.

Исследования были сфокусированы на двух участках, репрезентативных для региона, а именно Поле шахты Талдинская в Прокопьевском районе, добывающей уголь открытым способом, и разрезе Красногорском в Междуреченском районе (рисунок). Были проанализированы пробы воды из наблюдательных скважин, расположенных в непосредственной близости (50–100 м) от накопителей карьерных вод (отстойников), а также пробы непосредственно из акватории этих отстойников. Всего было обработано и проинтерпретировано шесть результатов химических анализов, выполненных в различные периоды развития угледобычи (таблица).



Расположение объектов исследования в контурах Кузнецкого бассейна.

Данные химических анализов вод отстойников и наблюдательных скважин

Участок	Отстойник уч. р-за Красногор- ский	Уч. р-за Красно- горский, набл. скв. 16	Отстойник уч. Поле шахты Талдинская (разрез)	Уч. Поле шахты Талдинская (разрез), набл. скв. 9	Отстойник уч. Поле шахты Талдинская (разрез)	Уч. Поле шахты Талдинская (разрез), набл. скв. 9
Год	2019	2019	2019	2019	2025	2025
pH	7.7	7.28	8	7.64	9.1	7.2
CO ₂	мг/лм ³	8.8	<10	7.04	<2	53
CO ₃		<3	74	<10	202	<2
HCO ₃ ⁻		256	1873	525	1318	1196
SO ₄ ²⁻		409	401	367	390	340
Cl ⁻		1.29	8.7	9.2	15.5	12
Об.ж.		4.93	11.60	7.45	2.10	12.10
Ca ²⁺		190	30	98	6	164
Mg ²⁺		25.62	22	31	22	47.6
Na ⁺		22	900	35	782	360
K ⁺		1.5	3.85	1.49	0.5	0.7
Fe ^{общ}			0.37	0.54	0.99	
Мин.		897.41	3204.55	713.69	2533.5	2120.3
NH ₄		0.3	0.15	1.41	0.24	0.078
NO ₂		0.012	<0.02	<0.02	0.065	0.071
NO ₃		3.42	233	0.21	184	0.62

Загрязненные карьерные стоки характеризуются формированием специфических геохимических условий, включая новые геохимические барьеры за счет насыщения вод по отношению к различным минералам, новые кислотно-щелочные показатели вод, нетипичный солевой состав. Анализ данных химического состава вод из наблюдательных скважин,

расположенных вблизи отстойников, и непосредственно из их акватории позволил выявить устойчивые гидрогеохимические аномалии:

- высокая минерализация: 0.9–3.0 г/дм³, что на порядок превышает фоновые значения для пресных подземных вод зоны гипергенеза для районов исследования [1, 3];
- высокие концентрации сульфатов и натрия: содержание ионов SO₄²⁻ (400–700 мг/дм³) практически соответствует природному значению HCO₃⁻, в случае района отстойника Красногорского разреза здесь и вовсе формируется сульфатный тип вод, доминирующая концентрация Na⁺ (до 900 мг/дм³) среди катионов. Это прямо указывает на техногенный генезис аномалии, отличный от природного (как правило, гидрокарбонатного кальциевого) [2];
- присутствие маркеров техногенеза: повышенные концентрации компонентов азотной группы (до 233 мг/дм³), связанные с применением промышленных взрывчатых веществ, а также хозяйственно-бытовыми стоками.

По сути, в данных наблюдательных скважинах геохимический тип подземных вод при нарушении гидродинамического режима подземных вод диктуется составом вод в отстойнике. Механизм формирования высоких концентраций сульфатов, очевидно, связан с окислением сульфидных минералов (преимущественно пирита FeS₂), широко распространенных в угленосных толщах. При осушении и вскрыше пластов происходит их интенсивное взаимодействие с кислородом воздуха и водой («кислотный дренаж»), приводящее к образованию серной кислоты и, как следствие, к выносу в раствор сульфат-ионов и катионов (Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺). В отстойнике идут процессы испарения и концентрирования за счет пресыщения к карбонатам (индекс насыщения SI к CaCO₃ +0.66...+1.34), происходит процесс их осаждения, способствующий снижению концентраций кальция в отстойниках и накоплению Na⁺, который в данных геохимических условиях остается подвижным даже при наблюдаемых высоких концентрациях. Массовое применение промышленных взрывчатых веществ на основе нитрата аммония является прямым источником поступления в сточные воды азотистых соединений (NO₃⁻), что подтверждается данными анализов (до 233 мг/дм³). Это служит независимым маркером техногенного воздействия. Инфильтруясь из отстойников, такие воды формируют устойчивый очаг загрязнения.

Особые гидродинамические условия для фильтрации загрязненных стоков из отстойников формируются за счет их расположения в зоне дренажного влияния разреза. Ключевым фактором, инициирующим интенсификацию перетока загрязненных вод из отстойника в подземные воды, является приближение фронта депрессионной воронки карьера к зоне расположения отстойника. В случаях, когда отстойники размещены на значительном удалении от активных горных работ, в наблюдательных скважинах, расположенных вблизи таких накопителей, признаки загрязнения подземных вод, как правило, не фиксируются.

Показательным примером служат результаты многолетних наблюдений на участке Поле шахты Талдинская (таблица). В 2019 г., когда карьерные работы велись на удалении, уровень подземных вод в наблюдательной скважине, прилегающей к отстойнику, составлял 4-5 м, а качество воды сохранялось на фоновом уровне, несмотря на высокую загрязненность вод в самом отстойнике. К 2025 г., по мере приближения карьера к данному участку (расстояние сократилось до ~200 м), произошло снижение уровня в скважине до 12-13 м, что сопровождалось резким ухудшением качества подземных вод: их состав стал практически идентичным составу вод в отстойнике, который за весь период наблюдений оставался стабильно загрязненным.

Формируемая участком угледобычи депрессионная воронка создает дополнительную значительную депрессию, под действием которой интенсивность фильтрации загрязненных вод через ложе отстойников может возрасти на порядок. В естественных условиях градиент напора ввиду высокого стояния уровня подземных вод незначителен и, соответственно, интенсивность фильтрации из отстойника относительно низкая или отсутствует. Сработка

уровней подземных вод увеличивает напор и градиент фильтрации из отстойника в водоносный горизонт. Данный фактор требует обязательного учета при проектировании накопителей и оценке экологических рисков на основе комплексного гидрогеологического моделирования, объединяющего работу карьерного водоотлива и фильтрацию из отстойников.

Как отмечается в статье [4], гидрогеохимия техногенных очагов характеризуется высокой временной изменчивостью, что требует соответствующей частоты отбора проб и контроля параметров, а не разовых измерений. На основе полученных данных необходима система мониторинга, предусматривающая детальный уровень: уплотненная сеть наблюдательных скважин вблизи отстойников (радиус 100–200 м) с высокой частотой отбора проб. Обязателен постоянный контроль уровня вод, позволяющий определить направление распространения загрязненных вод, что является решением практической задачи. В настоящее время мониторинг в отстойниках недропользователями, как правило, ведется по сокращенному набору компонентов, не позволяющему полноценно оценить динамику трансформации геохимического типа вод, которая способствует усилению миграции микрокомпонентов, включая токсичные и тяжелые металлы. В связи с этим необходимо расширить перечень контролируемых компонентов, миграция которых в водных растворах зависит от кислотности среды, содержания сульфатов, азотистых соединений.

Таким образом, установлено, что естественное осветление и осаждение, фильтрация через массив горных пород в системе каскадных отстойников не обеспечивают значимого снижения солевой нагрузки. Основной объем загрязняющих веществ, находящихся в растворенной форме, беспрепятственно мигрирует через систему очистки, инфильтрация через дно и борта неэкранированных отстойников создает устойчивые локальные очаги загрязнения подземных вод. Для новых и реконструируемых отстойников необходимо обязательное устройство противофильтрационных экранов (глиняных, геомембранных, комбинированных), также необходимо внедрение современных методов очистки сточных вод перед сбросом и повторное использование очищенных вод в технологических циклах предприятия (полив дорог), минимизирующее сброс.

Проведенное исследование однозначно идентифицирует отстойники как ключевые источники локального сульфатно-солевого загрязнения подземных вод Кузбасса. Переход от пассивного констатирующего наблюдения к активной динамической системе позволит обеспечить эффективный контроль и прогноз состояния геологической среды в условиях широкомасштабной угледобычи в Кузбассе и разработать научно обоснованные мероприятия по охране недр. Проблема носит не только геохимический, но и технологически управленческий характер. Требуются мероприятия по предотвращению инфильтрации и глубокой очистке карьерных стоков. Кроме того, необходимо расширить перечень контролируемых компонентов в водах в связи с формированием новых гидрогеохимических условий.

Список литературы

1. Домрочева Е.В. Геохимическая зональность подземных вод Кузбасса // Проблемы геологии и освоения недр : Труды XVI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 110-летию со дня основания горно-геологического образования в Сибири, Томск, 02–07 апреля 2012 года. Т. 1. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2012. С. 444–446.
2. Лузянин С.Л., Катенович Д.В., Осипова М.О., Неверова О.А. Оценка антропогенного воздействия угледобывающей деятельности на качество подземных и поверхностных вод (на примере разреза Пермиковский, Кемеровская область) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2025. Т. 27, № 3 (125). С. 206–216. DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-206-216.
3. Dutova E.M. Geochemistry of fresh groundwater in the Altai–Sayan folded area and adjacent areas of the West Siberian plate // Applied Geochemistry. 2020. Vol. 120. P. 104673. DOI 10.1016/j.apgeochem.2020.104673.
4. Nordstrom D.K. Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters // Applied Geochemistry. 2011. Vol. 26, Issue 11. P. 1777–1791.

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ ВЕРХНЕАЛЬБ-СЕНОМАНСКОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА НА ТАЛИНСКОМ УЧАСТКЕ НЕДР

Хабибуллин Р.Р.^{1,2}, Касимов Ж.Д.^{1,2}, Трифонов Н.С.², Кудряшова Л.К.^{1,2}, Мартынова С.А.²,
Колубаева Ю.В.²

¹Томский политехнический университет, Томск, rrhb@tpu.ru

²ООО «СахалинНИПИ нефть и газ», Томск

Аннотация. Авторами установлено, что верхнеальб-сеноманский водоносный горизонт апт-альб-сеноманского водоносного комплекса характеризуется аномально низкой водопроницаемостью на фоне более высоких значений гидрогеологических параметров водоносного комплекса в районе работ. На основе комплексной интерпретации данных геофизических исследований скважин, опытно-фильтрационных работ и результатов записи профилей притока выявлены высокопроницаемые интервалы, формирующие основной фильтрационный поток. Результаты выполненных исследований показывают, что данный подход повышает достоверность оценки фильтрационных параметров пласта и обосновывает необходимость дифференцированного учета неоднородности разреза при проведении перфорации в водозаборных и поглощающих скважинах.

Ключевые слова: Западно-Сибирский мегабассейн, апт-альб-сеноманский водоносный комплекс, Талинский участок, фильтрационно-емкостные свойства, интерпретация ГИС

Abstract. The authors established that the Upper Albion-Cenomanian aquifer within the Aptian-Albian-Cenomanian aquifer system is characterized by abnormally low transmissivity against the high hydrogeological parameters of the aquifer system in the study area. Highly permeable intervals forming the main filtration flow were identified by integrated interpretation of well logging data, aquifer tests, and production logging. The results of the conducted research demonstrate that this approach improves the reliability of reservoir filtration parameters estimation and justifies the need for a differentiated assessment of cross-section heterogeneity when performing perforation in water-intake and disposal wells.

Keywords: West Siberian megabasin, Aptian-Albian-Cenomanian aquifer system, Talinsky subsoil area, reservoir porosity and permeability, logging data interpretation

Апт-альб-сеноманский водоносный комплекс (ААС ВК) в пределах Западно-Сибирского мегабассейна на протяжении десятилетий служит ключевым объектом для добычи технических и размещения попутных вод в процессе разработки нефтяных месторождений. Эта практика особенно актуальна для зрелых месторождений с высокой обводненностью продукции, где требуется как поддержание пластового давления (ППД), так и размещение значительных объемов попутной воды.

История целенаправленного гидрогеологического изучения мезозойских, в частности меловых, отложений Западной Сибири, включая ААС ВК, начинается в середине XX в. и связана с именами таких исследователей, как Н.М. Кругликов, А.Э. Конторович, А.А. Карцев, В.М. Матусевич, и многих других [2–4]. Их работы заложили основу понимания формирования химического состава вод и гидродинамических особенностей коллекторов.

Красноленинское нефтегазоконденсатное месторождение в пределах Талинского участка недр расположено в западной части Ханты-Мансийского автономного округа, в пределах одноименного нефтегазоносного района Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, и является уникальным по величине запасов углеводородов. Его длительная эксплуатация, начатая во второй половине XX в. (с 1981 г.), обусловила устойчивую потребность как в добыче подземных вод для поддержания пластового давления, так и в размещении больших объемов попутных вод, не востребованных системой ППД. Для этих целей на Талинском участке недр в качестве объекта эксплуатации используется верхнеальб-сеноманский водоносный горизонт (ВАС ВГ), выделяемый в составе ААС ВК. За последнее десятилетие на Талинском участке из данного горизонта добыто порядка 20 млн м³ воды для ППД и размещено свыше 8 млн м³ попутных вод.

Обобщенные данные по различным нефтегазоносным районам (Нижевартровский, Вартровский, Александровский) свидетельствуют, что ААС ВК в целом обладает высокими фильтрационно-емкостными свойствами (коэффициент водопроницаемости часто превышает $100\text{--}200\text{ м}^2/\text{сут}$), обеспечивающими эффективную эксплуатацию водозаборов и участков размещения [6]. Однако в пределах Красноленинского месторождения, в том числе на ближайших к Талинскому участках (Ем-Еговский, Пальяновский, Каменный, Поттымско-Ингинский), отмечаются низкие значения фильтрационных параметров ВАС ВГ.

Таким образом, на фоне обширного опыта изучения и эксплуатации ААС ВК в регионе гидрогеологические особенности Красноленинского месторождения, особенно количественная оценка фильтрационных параметров с учетом неоднородности разреза, требуют детализации. Данная работа направлена на комплексный анализ гидродинамических характеристик ВАС ВГ ААС ВК на Талинском участке, сопоставление фильтрационных параметров, полученных разными методами, и оценку их достоверности.

Верхнеальб-сеноманский водоносный горизонт, входящий в состав ААС ВК, приурочен к отложениям уватской свиты и верхнехантымансийской подсвиты нижнего мела и надежно изолирован от выше- и нижележащих горизонтов.

Литологически горизонт представляет собой сложное переслаивание тонкозернистых песков, алевроитов и глин. Такие условия формируют расчлененную фильтрационную среду с ограниченной мощностью проницаемых прослоев. Значения коэффициентов водопроницаемости на участке составляют $0.5\text{--}3.6\text{ м}^2/\text{сут}$, фактические дебиты водозаборных скважин не превышают первых сотен кубических метров, что свидетельствует о преобладании коллекторов с низкой проницаемостью.

Одной из ключевых задач при обосновании возможности добычи подземных вод или размещения попутных вод является достоверная оценка гидродинамических параметров водоносных комплексов – коэффициента водопроницаемости (km) и коэффициента проницаемости (a). В практике изучения апт-альб-сеноманского водоносного комплекса на территории Западно-Сибирского мегабассейна фиксируется расхождение между значениями данных параметров, полученных прямым методом – по результатам обработки опытно-фильтрационных работ (ОФР), а также косвенным – по результатам интерпретации материалов геофизических исследований скважин (ГИС). Для решения этой задачи на Талинском участке в разное время были проведены опытно-фильтрационные работы как на водозаборных, так и на поглощающих скважинах. Непосредственно при участии авторов работы в период 2023–2025 гг. выполнены исследования по 6 водозаборным и 9 поглощающим скважинам (опытные откачки и нагнетания, гидропрослушивание). Также были проанализированы результаты интерпретации ГИС по 25 разведочным, 11 водозаборным и 5 поглощающим скважинам. Определение гидрогеологических параметров основано на изучении режима движения подземных вод при искусственном возбуждении фильтрационного потока посредством откачек и нагнетаний. Обработка данных ОФР выполнялась стандартным графоаналитическим методом, основанным на прослеживании изменения уровня во времени. Для определения фильтрационных параметров строились графики зависимости понижения уровня от логарифма времени ($\Delta S\text{--}lg(t)$ при откачках и $\Delta S\text{--}lg(t/R^2)$ при гидропрослушивании), по угловому коэффициенту Ct [1]. Среднее значение km по ОФР для отложений ВАС ВГ Талинского участка недр составляет $1.33\text{ м}^2/\text{сут}$.

Интерпретация данных ГИС проводилась в несколько этапов: сначала выделялись водонасыщенные пропластки в объеме всего ААС ВК, а затем – высокопроницаемые водонасыщенные интервалы. При определении коллекторских свойств пластов использовалась относительная амплитуда ПС ($\alpha_{ПС}$). В случае отсутствия кривой ПС в скважинах с неполным комплексом исследований, где применяется только метод ГК, используется граничное значение $\alpha_{ГКгр}$ (граничное значение было определено по соответствующей выборке кумулятивных кривых по $\alpha_{ГК}$ для коллекторов и неколлекторов). Петрофизические зависимости построены по керну для отложений викуловской свиты

Талинского участка недр. Все граничные значения параметров обоснованы в отчете по Талинскому участку недр, по которым осуществлялось выделение пластов-коллекторов.

Согласно В.М. Матусевичу, породы со значениями коэффициента проницаемости ниже 33×10^{-3} мкм² (что соответствует коэффициенту фильтрации менее 0.05 м/сут) при гидрогеологической схематизации принято относить к слабопроницаемым [5]. При сопоставлении значений α ПС (α ГК) и коэффициентов проницаемости, полученных при интерпретации материалов ГИС, было установлено, что данному пороговому значению проницаемости соответствует α ПС (α ГК) = 0.81 д.ед. Для выделения высокопроницаемых водонасыщенных интервалов в данной работе применялся единый критерий α ПС (α ГК) $\geq$ 0.81 д.ед., а выделенные по нему интервалы использовались в расчетах фильтрационных параметров (водопроницаемости и пьезопроводности). Таким образом, расчет параметров по ГИС на Талинском участке базируется на использовании апробированных в ГКЗ локальных зависимостей и обоснованного порогового значения α ПС (α ГК) для выделения высокопроницаемых интервалов. Среднее значение km , рассчитанное на основе фильтрационных параметров, полученных по ГИС, для отложений ВАС ВГ Талинского участка недр составляет 4.40 м²/сут, что превышает значение km по ОФР почти в три раза.

Расхождение между значениями коэффициента водопроницаемости, определенного по данным ГИС и результатам обработки ОФР, обусловлено различием объектов оценки. Расчет параметров по данным ГИС основан на допущении о том, что вся эффективная мощность водоносного горизонта представляет собой единый объект эксплуатации. В отличие от этого, данные, получаемые в ходе ОФР, характеризуют работу только «работающих» интервалов, вскрытых перфорацией (которые часто составляют небольшую часть водоносного горизонта). Это приводит к завышению фильтрационных параметров, что подтверждает необходимость проведения ОФР для их достоверной оценки.

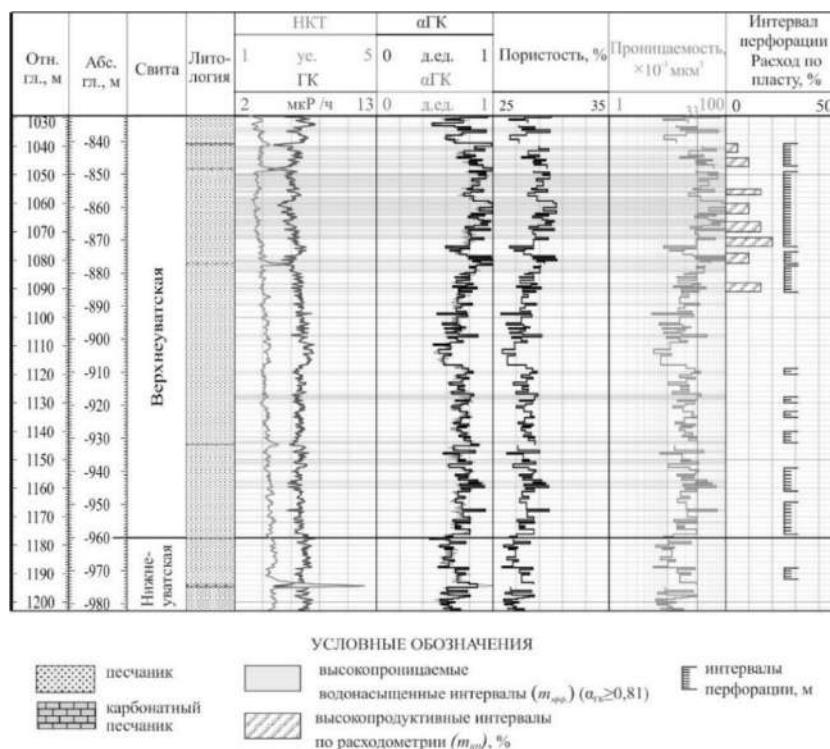
В ходе изучения авторами был проведен сравнительный анализ значений ФЕС, полученных разными методами, и оценена их сходимость. Анализ проводился в несколько итераций для последовательного уточнения границ высокопроницаемого коллектора: 1) по эффективной мощности высокопроницаемых водонасыщенных интервалов всего ВАС ВГ ($m_{эфф.}$); 2) по эффективной мощности высокопроницаемых интервалов, вскрытых перфорацией ($m_{эфф.перф.}$); 3) по высокопродуктивным интервалам ($m_{эфф.ВП}$), выделенным по данным расходомерии. Это позволило оценить, насколько точность определения ФЕС по данным ГИС зависит от детальности учета неоднородности пласта при выделении объекта эксплуатации. Полученные значения km сопоставлены с результатами обработки ОФР (таблица).

Сравнительный анализ коэффициентов водопроницаемости (km), полученных по данным ОФР и рассчитанных по ГИС (* % сходимости km по ГИС с результатами по ОФР)

Скв.	Среднее значение km по ОФР, $m^2/сут$	Результаты определения km ($m^2/сут$) по ГИС при пересчете на эффективную ($m_{эфф}$), эффективную перфорированную проницаемую ($m_{эфф.перф}$) мощность и эффективные высокопродуктивные проницаемые ($m_{эфф.ВП}$) интервалы, м										
		$m_{эфф}$	$km_{эфф}$	ОФР, %*	$m_{перф}$	$m_{эфф.перф}$	$km_{эфф.перф}$	ОФР, %*	$m_{ВП}$	$m_{эфф.ВП}$	$km_{эфф.ВП}$	ОФР, %*
1687	1.49	69.1	4.15	36	60	37.2	2.38	63	39.5	18.6	1.30	87
2578	2.07	95.7	8.61	24	60	46.8	4.42	47				
2652	1.71	63.3	5.06	34	100	40.9	3.08	56	29.0	14.0	1.26	74
4498	1.07	59.3	4.15	26	80	42.0	2.89	37				
11099	0.83	41.7	3.34	25	55	5.1	0.41	49				
3194	1.09	12.8	1.02	94	50	5.4	0.45	41				
9208	1.70	78.1	4.69	36	100	25.3	1.63	96	40.6	16.1	0.97	57
2833	1.75	41.9	5.45	32	80	37.8	2.78	63	28.0	17.8	1.42	81
3462	1.12	101.6	6.10	18	60	40.7	2.62	43				
4028	0.89	53.9	3.77	24	86	20.0	1.44	62				
4878	0.67	45.7	2.74	24	96	19.6	1.16	58				
3035	1.54	45.9	3.21	48	80	20.8	1.44	94				
Ср.знач.	1.33	59.10	4.36	35	76	28	2.06	59	34	17	1.24	75

Пересчет параметров данных ГИС при переходе к высокопродуктивным интервалам, определяемым по расходомерии, позволяет получить значения коэффициентов водопроницаемости и пьезопроводности, сопоставимые с результатами обработки данных ОФР. Значение коэффициента водопроницаемости по ГИС составило $1.24 \text{ м}^2/\text{сут}$, а по ОФР – $1.33 \text{ м}^2/\text{сут}$. Также стоит отметить, что среднее значение коэффициента пьезопроводности по данным ГИС ($0.12 \times 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}$) хорошо согласуется с результатом, полученным методом гидропрослушивания ($0.13 \times 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}$).

Промыслово-геофизическая характеристика отложений ВАС ВГ в интервалах перфорации на примере поглощающей скважины № 2833 наглядно демонстрирует процесс выделения высокопродуктивных интервалов (рисунок).



Промыслово-геофизическая характеристика отложений ВАС ВГ в интервалах перфорации по скважине № 2833 Талинского участка.

Проведенный анализ показал, что для получения корректных фильтрационных параметров и построения в дальнейшем достоверной гидрогеологической модели ВАС ВГ в расчетах необходимо учитывать не всю эффективную мощность водонасыщенных коллекторов, а только эффективную мощность высокопроницаемых интервалов, вскрытых перфорацией или выделенных по данным расходомерии.

Список литературы

1. Боровский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра, 1973. 305 с.
2. Карцев А.А. Гидрогеология нефтяных и газовых месторождений М.: ГОСТОПТЕХИЗДАТ, 1963.
3. Конторович А.Э., Ершов С.В., Казаненков В.А. и др. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в меловом периоде // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 5-6. С. 745–776.
4. Кругликов Н.М., Нелюбин В.В., Яковлев О.Н. Гидрогеология Западно-Сибирского нефтегазового мегабассейна и особенности формирования залежей углеводородов. Л.: Недра, 1985. 279 с.
5. Матусевич В.М., Ковяткина Л.А. Нефтегазовая гидрогеология Западно-Сибирского мегабассейна. Ч. II. Тюмень: ТюмГНГУ, 2010.
6. Фильтрационные параметры апт-альб-сеноманского комплекса, определяемые различными методами при добыче и закачке подземных вод / Т.А. Боровская, В.Г. Ланшаков, А.Р. Курчиков, В.М. Матусевич, под общей редакцией В.В. Долгушина. Т. 2. Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. С. 143–146.

ОЦЕНКА СОВМЕСТИМОСТИ ПЛАСТОВЫХ И ЗАКАЧИВАЕМЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ ТАЛИНСКОГО УЧАСТКА НЕДР КРАСНОЛЕНИНСКОГО НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Хабибуллин Р.Р.^{1,2}, Колубаева Ю.В.², Трифонов Н.С.²

¹ Томский политехнический университет, Томск, rrh6@tpu.ru

² ООО «СахалинНИПИ нефти и газа», Томск

Аннотация. В работе представлены результаты физико-химического моделирования изменений, происходящих в коллекторе при смешении пластовых и закачиваемых вод при размещении излишков попутных вод и вод, использованных для производственных и технологических нужд недропользователя (на примере территории Талинского участка недр Красноленинского нефтегазоконденсатного месторождения). Расчеты, выполненные с использованием программного комплекса HydroGeo, показали преобладание процессов вторичного минералообразования (преимущественно карбонатизации) над процессами растворения пород коллектора. Установлена зависимость роста количества прогнозируемого осадка с увеличением доли закачиваемых вод; состав и проницаемость пород коллектора при взаимодействии с закачиваемыми водами в различных пропорциях изменяются незначительно, что указывает на хорошую совместимость данных типов вод.

Ключевые слова: Талинский участок недр, пластовые и закачиваемые воды, совместимость пластовых и закачиваемых вод, коллектор

Abstract. This article presents the results of physicochemical modeling of reservoir changes during the formation and injected waters mixing in the process of disposing excess produced water and water used for the production and technological needs of the license holder (in the Talinsky subsurface site of the Krasnoleninsky oil, gas, and condensate field). Calculations performed using the HydroGeo software package showed the predominance of secondary mineral formation processes (mainly carbonatization) over reservoir rock dissolution processes. A correlation was established between the increase in the predicted secondary precipitate volume and the increase in the proportion of injected water in the mixture. The composition and permeability of the reservoir rocks change insignificantly upon interaction with injected waters in various proportions, indicating high compatibility of these waters.

Keywords: Talinsky subsoil area, formation and injected waters, compatibility of formation and injected waters, reservoir

На месторождениях Западной Сибири в качестве источника технических подземных вод для водоснабжения систем поддержания пластового давления (ППД) и полигона для размещения попутных вод широко используется апт-альб-сеноманский водоносный комплекс (ААС ВК). На Талинском участке недр Красноленинского нефтегазоконденсатного месторождения в качестве поглощающего горизонта для размещения попутных вод, не востребованных системой ППД, используется верхнеальб-сеноманский водоносный горизонт (ВАС ВГ) в объеме уватской свиты и верхнехантымансийской подсвиты. В административном отношении Талинский участок недр Красноленинского нефтегазоконденсатного месторождения находится в Октябрьском, Советском и Ханты-Мансийском районах Ханты-Мансийского автономного округа – Югра Тюменской области в 90 км (от центра участка) к юго-востоку от г. Нягань.

С целью изучения и прогноза последствий закачки вод (попутных и использованных для производственных и технологических нужд недропользователя) в отложения эксплуатационного объекта проводится оценка соответствия физико-химических характеристик вод предъявляемым требованиям. При этом особенно значимой характеристикой является совместимость пластовых и закачиваемых вод, поскольку при размещении излишков попутных вод в пласты-коллекторы образуется сложная многокомпонентная система: закачиваемая вода – пластовая вода – порода пласта. Необходимость изучения состояния равновесия в этой системе вызвана проблемой возможного солеотложения в нагнетательных скважинах и эксплуатационных объектах, вызывающего ухудшение коллекторских свойств пластов и снижение производительности оборудования. В этой связи для пластовых вод ВАС ВГ, попутных вод и вод, используемых для собственных производственных и технологических нужд, на территории Талинского участка недр проведена оценка их совместимости с использованием программного

комплекса HydroGeo, позволяющего спрогнозировать состав и количество образующегося при смешении вод осадка, а также изменение фильтрационно-емкостных свойств пласта-коллектора.

В работе для расчетов использованы обобщенные данные результатов анализа физико-химических параметров пластовых и закачиваемых вод за период 2020–2025 гг. Анализ данных аналитических исследований показал, что пластовые воды ВАС ВГ Талинского участка недр имеют хлоридный натриевый состав. В соответствии с расчетным средним значением величины общей минерализации (15.6 г/дм^3) воды относятся к группе солоноватых [4]. По величине общей жесткости воды соответствуют очень жесткому типу, по среднему значению щелочно-кислотного показателя (7.4 ед. pH) классифицируются как нейтральные. Среди анионов преобладает ион хлора (среднее содержание 9202 мг/дм^3). Концентрация гидрокарбонат-иона составляет 249 мг/дм^3 , содержание сульфат-иона в пробах незначительное (1.22 мг/дм^3). Среди катионов преобладающим является натрий, концентрация которого в водах составляет 5544 мг/дм^3 , содержание (в мг/дм^3) кальция – 341, калия – 24.5, магния – 110, аммоний-иона – 20.13.

В целом, по данным химических анализов попутных вод и вод, используемых для собственных производственных и технологических нужд недропользователя, исследуемые воды по химическому составу и типовой принадлежности близки к пластовым водам ВАС ВГ Талинского участка недр. Воды также имеют хлоридный натриевый состав, являются очень жесткими, по среднему значению щелочно-кислотного показателя (7.4 ед. pH) классифицируются как нейтральные. При этом при общей схожести физико-химических параметров состава закачиваемых и пластовых вод наблюдаются значительные отличия в средних величинах основных солеобразующих компонентов и общей минерализации. Так, среднее значение величины общей минерализации (10.8 г/дм^3) для данного типа вод существенно ниже среднего значения для пластовых вод. Содержание хлора составляет 5794 мг/дм^3 , натрия – 3885 мг/дм^3 . Концентрация гидрокарбонат-иона, напротив, значительно выше и составляет 895 мг/дм^3 . Содержания остальных ионов макрокомпонентного состава вод незначительно (в мг/дм^3): сульфат-иона – 2.14, кальция – 147, калия – 41.6, магния – 48, аммоний-иона – 12.4.

Поведение закачиваемых вод в условиях верхнеальб-сеноманского коллектора в геохимическом отношении носит сложный характер, определяющийся не только смешением закачиваемых и пластовых вод, но и взаимодействием смеси этих вод с минералами горных пород. Совместимость пластовых и закачиваемых вод, как правило, основана на оценке возможного образования осадка карбоната или сульфата кальция. Для полного представления о вторичном минералообразовании, происходящем в отложениях эксплуатационного объекта при смешении вод, в систему при расчетах были включены минералы алюмосиликатных горных пород, входящих в состав пород коллектора.

Минеральный состав коллектора (в объеме уватской свиты и верхнехантымансийской подсвиты) в районе Талинского участка недр был принят по данным усредненного литологического описания на соседних месторождениях ХМАО и Томской области, исходя из предположения о выдержанности состава отложений в пределах Западно-Сибирского артезианского бассейна [1–3]. Таким образом, к числу минералов, слагающих породы коллектора, относятся (в скобках – содержание минерала в %): кварц SiO_2 (52.62), полевой шпат KAlSi_3O_8 (14.59), альбит $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (8.99), анортит $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (3.02), мусковит $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (0.99), биотит $\text{K}(\text{Fe}^{2+})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (0.169), каолинит $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (11.72), монтмориллонит $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (2.21), кальцит CaCO_3 (2.98), сидерит $(\text{Fe}^{2+})\text{CO}_3$ (0.60), иллит $\text{K}_{0.67}\text{Al}_{2.67}\text{Si}_{3.33}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (0.76), хлорит $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ (1.34).

Расчеты совместимости вод были проведены при разных соотношениях пластовых и закачиваемых вод: смесь пластовых (А) и закачиваемых (В) вод в пропорциях от 0.75:0.25 до 0.0:1.0 доли единиц (или в процентном соотношении от 75 %:25 % до 0 %:100 %) имитирует увеличение доли закачиваемых вод по мере приближения к поглощающей скважине в общем объеме пластовых вод до их полного заполнения коллектора. На каждом этапе смешения

выполнялся расчет взаимодействия в системе вода – порода с учетом времени (1 826 сут), взятого из расчета работы участка размещения.

Результаты физико-химического моделирования показали, что основные геохимические изменения представляют собой процесс карбонатизации коллектора (таблица, рисунок). Ввиду незначительного содержания в водах сульфат-иона образование твердых осадков сульфата кальция (CaSO_4) не прогнозировалось, что было подтверждено результатами расчетов. Также полученные данные свидетельствуют о преобладании процессов вторичного минералообразования над процессами растворения породы коллектора. При закачке каждого литра раствора количество новообразованных минералов возрастает с увеличением в смеси доли закачиваемых вод и составляет для кальцита от 29 до 59 мг, для сидерита – от 0.96 до 5.2 мг, для алюмосиликатов наблюдаются незначительные изменения. Полученные результаты свидетельствуют о возможности постепенного, но крайне незначительного ухудшения фильтрационно-емкостных свойств пласта и приемистости поглощающей скважины. При этом следует подчеркнуть, что каждый цикл промыва приводит к крайне незначительному изменению состава породы и открытой пористости, которая по данным проведенных расчетов практически не изменяется (таблица).

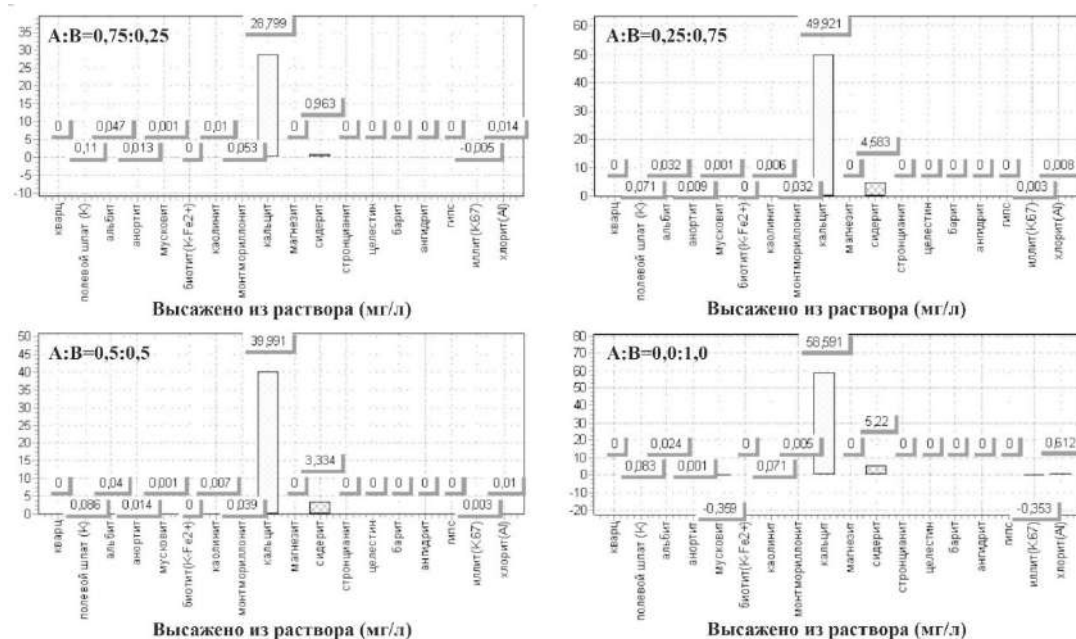
Исходный состав, физические характеристики исследуемых вод и результаты расчетов изменения состава породы коллектора при смешении пластовых и закачиваемых вод

Исходные данные			Изменение состава породы, % объема				
Параметр раствора	Пластовые воды ВАС ВГ	Закачиваемые воды	Минерал, характеристика	0.75*/0.25	0.50/0.50	0.25/0.75	0.00/1.00
Плотность, кг/м ³	1011	1008	Кварц	52.6191	52.619	52.6189	52.6188
pH, ед. pH	7.4	7.4	Полевой шпат	14.5899	14.5899	14.5899	14.5899
Жесткость общая, °Ж	25.8	11.2	Альбит	8.98968	8.98966	8.98965	8.98964
Ионная сила, моль/дм ³	0.277	0.14	Анортит	3.01962	3.01961	3.01961	3.0196
Na ⁺ **	5544	3885	Мусковит	0.999624	0.999623	0.999621	0.999615
K ⁺	24.5	41.6	Биотит	0.169948	0.169948	0.169948	0.169947
Ca ²⁺	341	147	Каолинит	11.7196	11.7196	11.7196	11.7196
Mg ²⁺	110	48	Монтмориллонит	2.21037	2.21037	2.21036	2.21036
Fe ²⁺	5.05	6.7	Кальцит	2.98147	2.98161	2.98174	2.98186
NH ₄ ⁺	20.13	12.4	Магнезит	0	0	0	0
Cl ⁻	9202	5794	Сидерит	0.600056	0.600087	0.600102	0.60011
HCO ₃ ⁻	249	895	Стронцианит	0	0	0	0
SO ₄ ²⁻	1.22	2.14	Целестин	0	0	0	0
SiO ₂	19.7	41.1	Барит	0	0	0	0
Li ⁺	0.17	1.03	Ангидрит	0	0	0	0
Al ³⁺	0.039	0.016	Гипс	0	0	0	0
J	14.3	11.0	Иллит	0.75975	0.759749	0.759748	0.759743
Br	39.5	29.6	Хлорит	1.34082	1.34082	1.34082	1.34083
M***	15600	10800	Открытая пористость, %	26.00884	26.00871	26.00861	26.00852

Примечание. * – пропорции смешения (д.е.): пластовая вода/закачиваемая вода; ** – средние содержания, мг/дм³; *** – общая минерализация.

Исходное значение открытой пористости пород коллектора Талинского участка недр составляет 26.00912 % (принятого по данным геофизических исследований скважин), из этого следует, что только 0.26 м³ (или 260 л) вмещающей породы могут быть заполнены закачиваемым раствором. В пересчете на осадок карбоната кальция (при зафиксированном для него максимуме 59 мг из литра) при закачивании раствора в объеме 260 л в каждом кубометре коллектора может выпасть 15340 мг минерала (или 0.01534 кг). При плотности

кальцита (составляющего основную массу (92 %) выпадающего осадка) 2710 кг/м^3 объем новообразованных минералов составит 0.0000057 м^3 (или 0.00057%). В действительности, с участием значительных реальных скоростей движения жидкости, не позволяющих кристаллизации реализоваться в полной мере, а также реального объема пор (по которым могут свободно перемещаться подземные воды) пласта-коллектора, количество закачиваемого раствора на 1 м^3 породы, а следовательно, и новообразованных минералов может существенно снизиться. Изменение величины открытой пористости в четвертом знаке после запятой не может снизить приемистость скважин на 20% , что является критерием совместимости или несовместимости закачиваемого раствора с пластовой водой и породой.



A - пластовые воды, B - закачиваемые воды, 0,75:0,25 - пропорции смешения, д.е.

Состав и количество выпадающих (положительные значения) и растворяющихся (отрицательные значения) твердых фаз по результатам расчета взаимодействия закачиваемых вод с пластовыми водами и породами ВАС ВГ при разных пропорциях смешения.

Таким образом, по результатам физико-химического моделирования показано, что техногенное изменение коллектора связано в основном с образованием кальцита, сидерита и незначительного количества алюмосиликатов. Установлена зависимость роста количества прогнозируемого осадка с увеличением доли закачиваемых вод; состав и проницаемость пород коллектора при взаимодействии с закачиваемыми водами в различных пропорциях изменяются незначительно, что указывает на хорошую совместимость пластовых и закачиваемых вод Талинского участка недр.

Список литературы

1. Афонин И.В. Геохимические особенности терригенных отложений на примере верхней части покурской свиты Ваньеганской нефтегазоносной структуры (Западная Сибирь): Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук / Томск: ТГУ, 2017. 22 с.
2. Бехтер О.В., Афонин И.В., Ивлев Д.А. Литофациальный анализ и палеогеографические реконструкции верхнесеноманских отложений горизонта ПК1-2 (покурская свита, Ван-еганское месторождение, Западная Сибирь) // Вестник Томского государственного университета. 2014. № 386. С. 201-208.
3. Кудаманов А.И., Карих Т.М., Кочетов А.В., Панев Е.В. Особенности распределения глинистых минералов в сеноманских коллекторах месторождения Русское Западной Сибири // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2015. № 11. С. 48-54.
4. ГОСТ 41-05-263-86 Отраслевой стандарт. Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре. М.: ВСЕГИНГЕО, 1986. 14 с.

ANALYSIS OF SPATIOTEMPORAL DIFFERENCES IN SHALLOW GROUNDWATER RESPONSE TO EXTREME PRECIPITATION IN THE BEIJING PLAIN

Wan X.Y.^{1,2,3}, Cheng S.Y.^{1,2,3}, Wang H. X.^{1,2,3}, Zhang R.^{1,2,3}, Yin Y.C.³, Li X.J.^{1,2,3}

¹College of Resources, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing, China;

²Beijing Laboratory of Water Resources Security, Capital Normal University, Beijing, China;

³Key Laboratory of Land Subsidence Monitoring and Prevention, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing, China; 2240902206@cnu.edu.cn

Аннотация. На фоне глобального изменения климата процессы водного цикла усилились, а экстремальные погодные явления, такие как засухи и сильные дожди, стали происходить чаще и с большей интенсивностью. Выяснение механизмов пространственной неоднородности динамики подземных вод имеет большое значение, однако выводы относительно этих механизмов колебаний пока не сделаны. В данном исследовании используются еженедельные данные мониторинга глубины подземных вод из 127 наблюдательных скважин на равнине Пекина за период с 2021 по 2025 г. для изучения пространственно-временной изменчивости мелких подземных вод в ответ на экстремальные осадки. Сосредоточившись на сценариях обычных и экстремальных осадков, в исследовании сравниваются пространственно-временные характеристики мелких подземных вод при различной интенсивности осадков.

Ключевые слова: Пекинская равнина, экстремальные осадки, неглубокие грунтовые воды, пространственно-временной отклик, зонирование географических процессов

Abstract. Against the backdrop of global climate change, water cycle processes have intensified, with extreme weather events such as droughts and heavy rainfall occurring more frequently and with increasing intensity. Clarifying the spatial heterogeneity response mechanisms of groundwater dynamics holds significant importance; however, conclusions have yet been reached regarding these fluctuation mechanisms. This study utilizes weekly depth to water monitoring data from 127 observation wells in the Beijing Plain region between 2021 and 2025 to investigate the spatiotemporal variability of shallow groundwater in response to extreme precipitation events. Focusing on two scenarios—conventional precipitation and extreme precipitation, this study conducts a comparison of the spatiotemporal characteristics of shallow groundwater under different precipitation intensities.

Keywords: Beijing plain, extreme precipitation, shallow groundwater, spatiotemporal response, geographical process zoning

Groundwater systems are a vital component of the hydrosphere. Climate change significantly impacts the circulation and renewal of the hydrosphere, and its evolution is not only crucial to the restoration of regional ecosystems but also directly affects the survival of groundwater-dependent ecosystems[4]. Global climate change poses a severe threat to regional water resource supply and water security by disrupting the regional water cycle pattern. In fact, relevant studies have confirmed the significant impact of extreme precipitation events on groundwater dynamics. For instance, monitoring data from the Volga-Ural region indicate that extreme precipitation can drive the short-term rapid rise of shallow groundwater levels by enhancing infiltration processes and significantly alter their intra-annual fluctuation characteristics[1]. Such studies provide cross-regional references for unraveling the response mechanism between extreme precipitation and groundwater.

In the Beijing area, long-term excessive groundwater extraction has historically caused a series of eco-environmental problems, such as the expansion of groundwater cones of depression and the intensification of land subsidence. In recent years, with the water supplement from the South-to-North Water Diversion Project, artificial groundwater recharge, and the implementation of groundwater extraction restriction policies, the shallow groundwater level in the Beijing Plain has shown a steady recovery trend[8]. As the primary recharge source of groundwater, rainfall infiltration plays a significant regulatory role in the dynamic changes of groundwater levels[2][3]. Besides, precipitation has become a core driver determining the long-term evolution and short-term fluctuations of groundwater, and extreme precipitation can more rapidly and substantially replenish groundwater storage[6]. For example, the “7•21” extreme rainfall event in 2012 and the extreme precipitation from late July to early August 2023 both triggered severe floods, resulting in significant casualties and economic losses[7]. Extreme precipitation events have intensified the complexity of shallow groundwater's response to precipitation. Clarifying the spatiotemporal characteristics of this

response is crucial for groundwater recharge assessment, water resource management, and disaster prevention and mitigation.

Based on weekly shallow groundwater depth to water and daily precipitation time-series data from 2021 to 2025, combined with the Cross-Correlation Function (CCF) and Hilbert-Huang Transform (HHT) methods, this study focuses on addressing two core research questions: (1) Quantify the spatiotemporal evolution characteristics of shallow groundwater depth to water in the Beijing Plain under different extreme precipitation events, as well as its response relationship with extreme precipitation, and clarify the spatiotemporal heterogeneity of response lag, peak intensity, and characteristic periods; (2) Based on the coupling of geographical process zoning and the spatiotemporal response characteristics of groundwater, identify and define the typical extreme precipitation-shallow groundwater response patterns, and elaborate on the core formation mechanisms and spatial differentiation laws of different patterns. This study provides important reference value for regions highly sensitive to changes in precipitation patterns and extreme hydroclimatic events.

The Beijing Plain is located in the southeastern part of Beijing, with a total area of approximately 6338 square kilometers. It has a geographical pattern of being flanked by mountains on two sides and open to the southeast. Driven by the combined effects of the mountainous terrain in the northwest and the temperate continental monsoon climate with semi-humid conditions in the North Temperate Zone, the plain features distinct seasonal climatic variations. For one thing, orographic lifting tends to trigger localized heavy precipitation; for another, dominated by the southeast monsoon from July to August each year, it exhibits an extremely prominent seasonal precipitation pattern, with rainfall in the wet season (typically summer) accounting for 60 %–75 % of the annual total precipitation.

The weekly depth to water data used in this study were obtained from the automatic monitoring wells of the Beijing Water Authority, and the meteorological data include the ERA5-Land daily reanalysis dataset and in-situ observational data (Table). Although the ERA5-Land dataset generally performs well across China, its quality varies across regions and is significantly affected by topographic factors and seasonal variations[5]. Based on the applicability evaluation results of the ERA5-Land reanalysis dataset for Beijing, the precipitation values from the reanalysis data are generally lower than the observational values, showing a systematic underestimation bias. The ERA5-Land data were subjected to bias correction with reference to the China Surface Climate Dataset (Daily, V3.0). The corrected data exhibit a better linear fit with the observational values and a reduced degree of dispersion.

Detailed information on the data used in this study.

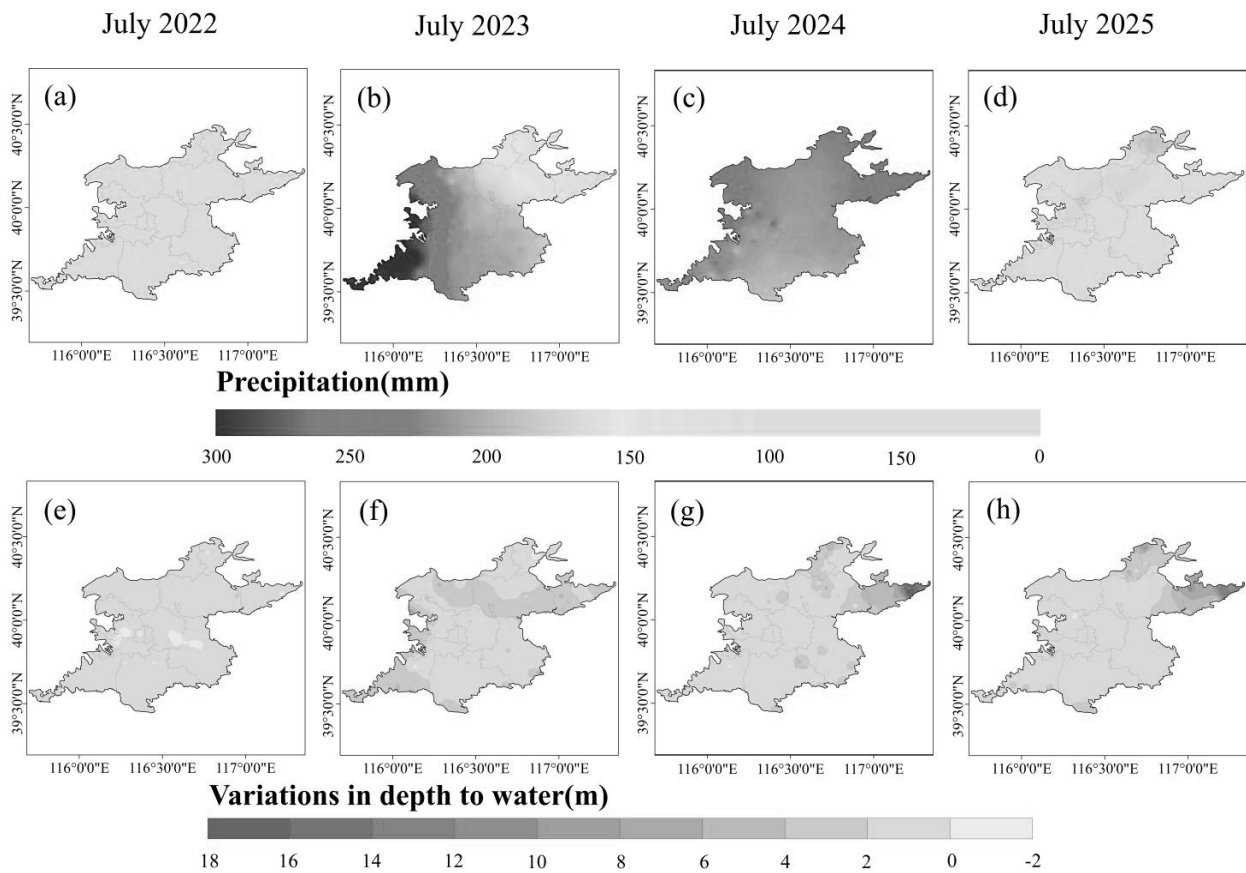
Data Type	Variable	Spatiotemporal Resolution	Time Period	Dataset
Depth to water	Shallow groundwater depth to water	127 monitoring wells, weekly	2021-2025	Beijing Water Authority
Climate dataset	Reanalysis precipitation data	0.1°, daily	2021-2025	ERA5-Land reanalysis dataset
	Observational precipitation data	27 observation stations, daily	2000-2023	China Surface Climate Dataset (Daily, V3.0)

Affected by global climate change, extreme precipitation events have occurred frequently in the Beijing area in recent years. In particular, the two extreme precipitation events that have taken place since 2021 have both triggered a short-term rapid rise in groundwater levels, introducing new uncertainties to the prevention and control of regional land subsidence and the assessment of rebound risks. Combined with the spatiotemporal variability distribution maps of cumulative shallow

groundwater-precipitation amounts in 2022–2025 (Figure), this study systematically analyzes the spatiotemporally heterogeneous response characteristics of shallow groundwater depth to water to conventional and extreme precipitation processes.

In 2022, the overall rainfall in the study area was low, corresponding to generally insignificant variations in groundwater depth to water and the absence of concentrated high-variation areas in space. Only minor fluctuations were observed in local piedmont zones, reflecting the limited recharge effect of conventional low precipitation on groundwater. The period of 2023–2024 represented the core phase impacted by extreme precipitation, where high-variation areas marked in red emerged centrally in the map with variations significantly greater than those in other years. The “23•7” rainstorm event recorded a total rainfall of 202.4 mm, driving a rapid rise in groundwater levels with peaks occurring within 7 days after the rainstorm and a long response duration. High-variation areas were mainly distributed in the piedmont recharge zone, with the rise amplitude significantly higher than that in the southeastern plain area. Characterized by a long duration, the “24•7” rainstorm led to high groundwater depth variation areas concentrated in eastern Pinggu. This area is located in the piedmont zone in the northeastern Beijing Plain, dominated by coarse-grained alluvial-proluvial sediments with high permeability and rapid groundwater runoff, resulting in a higher sensitivity to recharge from mountainous areas.

In 2025, the overall rainfall in the study area remained low and the overall variation in groundwater was gentle; however, a distinct groundwater level recovery trend was observed in Pinggu and Miyun. Adjacent to the northern mountainous areas, this region forms differentiated characteristics from other areas due to the combined effects of the weak accumulation of piedmont lateral recharge and local hydrogeological conditions, which is also associated with anthropogenic disturbance factors such as regional groundwater artificial recharge.



Spatial distribution of precipitation (a–d) and Variations in depth to water (e–h) from 2022 to July 2025

References

1. Шестаков, В.М., Глушко В.И., Петров А.Н., 2023. Влияние экстремальных осадков на динамику уровня грунтовых вод в Волго-Уральском регионе. Русская метеорология и гидрология, 48(10): 789-796.
2. Allocca, V., Deidda, R., Piga, D., 2015. Groundwater response to rainfall in a semi-arid coastal aquifer. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 5: 152-165.
3. Cai, Z., & Ofterdinger, U. 2016. Analysis of groundwater-level response to rainfall and recharge estimates in fractured hard rock aquifers, NW Ireland. *Hydrogeology Journal*, 24(8): 1947-1960.
4. Chen, J., Yang, H., Wang, L. 2019. Impact of climate change on groundwater recharge in the North China Plain: A modeling study. *Journal of Hydrological Processes*, 33(14): 2345-2358.
5. Huang, X.L., Wu, W., Xu, J.H., et al. 2023. Applicability evaluation of ERA5-Land precipitation reanalysis data in Southwest China. *Plateau Meteorology*: 42 (6): 1562-1575.
6. Li, S., Wang, H., Zhang, L., et al. 2022. Groundwater level recovery and land subsidence mitigation in the Beijing Plain: Effects of the South-to-North Water Diversion Project. *Journal of Hydrology*, 612: 128345.
7. Li, T., Yin, S., Xiao, Y., et al. 2026. Quantifying rainfall variability and potential hazards of extreme events in Beijing through stochastic simulations. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 63: 103068.
8. Taylor, R.G., Scanlon, B.R. 2020. Groundwater and climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(1): 3-16.

Авторский указатель

Абдрашитова Р.Н., 7, 217
Абрамов В.Ю., 402
Абукова Л.А., 7,
Акзигитов Н.И., 315
Аксеновская А.А., 372
Александров И.А., 38
Алексеев С.В., 11, 388
Алексеева Л.П., 11, 388
Аракчаа К.Д., 15, 262, 304
Асеева А.В., 107
Асламов И.А., 54
Асочакова Е.М., 99
Аузина Л.И., 19

Бадминов П.С., 262, 304
Баишев Н.Е., 156, 225
Балобаненко А.А., 388
Барановская Е.И., 266, 293
Барахтенко В.В., 146
Бежин Н.А., 346
Березина О.А., 232
Блохин П.А., 134
Бокс М., 64
Болдина С.В., 380
Борзенко С.В., 56
Брагин И.В., 38
Брейтенбах С.Ф.М., 64
Букин С.В., 54
Бурнайкин Д.Н., 376

Вакс А., 64
Ван Пин., 141
Василевский П.Ю., 229
Васильев Д.М., 315
Вахромеев А.Г., 270, 281
Вашурина М.В., 42
Велюга Д.М., 50
Верхозин И.И., 19
Верхотуров А.Г., 221
Вилькина М.В., 327, 352
Виноград Н.А., 116
Владимиров К.В., 119
Володина И.В., 99
Волошина Е.В., 183, 289

Гагарин Л.А., 160
Гайдукевич В.А., 164
Галиева А.Р., 239
Гарипова Е.Р., 243
Гембель Л.Р., 327, 352
Глотов В.Е., 168, 172
Голубев В.А., 274

Горбунова М.П., 399
Горбунова Э.М., 123
Горохов А.П., 270, 281
Горохова Н.Б., 176
Григорьев В.Ю., 127
Гриневский С.О., 127, 141
Губин И.А., 281
Гуляева Ю.В., 42
Гусева Н.В., 278
Гутарева О.С., 64

Дабу Н., 402
Данзанова М.В., 156, 221
Данилова М.А., 270, 281, 285
Даштсерен А., 64
Дедюлин И.Н., 229
Деменев А.Д., 232
Демидова Е.В., 270
Джабарова Н.К., 319
Добрынина А.А., 388
Домрочева Е.В., 46, 50
Дребот В.В., 50
Дружинин С.В., 111
Дубровин К.А., 130, 384
Дульцев Ф.Ф., 331
Дурбан Л.А., 15
Дутова Е.М., 99, 413

Егоров Т.С., 130, 343
Ереев Д.А., 327
Ескин А.Ю., 262
Ефремов В.С., 191

Жинак К., 339

Завалей В.А., 339
Заиров Ж., 339
Запригалова В.А., 278
Зарубов М.С., 285
Захаренко А.С., 54
Зелинская Е.В., 146, 301
Земская Т.И., 54
Зиппа Е.В., 56, 75, 91
Зыков С.Б., 111

Иванова Д.С., 87
Иванова Л.Д., 179
Ильин А.В., 402
Ильясова А.М., 95
Ишков А.А., 285

Кабыченко Н.В., 123
Казак Е.С., 107, 207
Калачева Е.Г., 183, 289
Капырин И.В., 396
Карабцов А.А., 107
Караулов В.А., 137
Каримова Д.Б., 99
Касимов Ж.Д., 405, 417
Каюкова Е.П., 60
Квачко С.К., 270
Кириухин А.В., 270, 376
Коваленко Т.С., 319
Ковяткина Л.А., 217
Козлов Ю.А., 130, 343
Колубаева Ю.В., 417, 421
Кононов А.М., 64
Копылова Г.Н., 380
Корзун А.В., 281, 93
Король И.С., 46, 79
Котович А.Д., 297
Коханенко А.А., 319
Крюкова И.Г., 262, 304
Кудряшова Л.К., 405, 417
Курочкин В.Ю., 308

Лаврушин В.Ю., 107
Лебедева Л.С., 68, 409
Левин А.В., 270, 281
Лемзиков М.В., 376
Лепокурова О.Е., 71
Лехов В.А., 127, 141
Лыков Р.С., 281
Людвиг В.М., 413

Макаров В.Н., 187
Максимович Н.Г., 232
Маргерум Д., 64
Маркова С.А., 187
Мартынова С.А., 417
Мешкова А.В., 281
Мизев А.А., 232
Мисюркеева Н.В., 270
Монхороева Л.М., 146, 301
Мусин Р.Х., 239
Мухортина Н.А., 46, 75, 79

Назима В.В., 143
Нарангэрэл С., 64
Неуважаев Г.Д., 134
Николаева Е.С., 160
Никуленков А.М., 327, 352

- Новиков Д.А., 335, 339, 346
Новиков К.А., 396
- Огонеров В.В., 156, 191, 225
Озерский А.Ю., 137
Озерский Д.А., 134
Оргильянов А.И., 262, 304
Осинцев А.В., 64
- Павленко О.Л., 308
Павлов А.А., 38
Павлов С.Х., 83
Павлова Н.А., 164, 187, 199, 409
Паламарчук В.А., 409
Панов Е.А., 137
Пачина Е. П., 26
Пашагин А.В., 413
Пашкова Г.В., 87, 399
Пеллинен В.А., 87
Петров В.В., 311
Петров С.В., 56
Петрова Д.В., 134
Петухова С.М., 123
Плавник А.Г., 23, 42
Плюснин А.М., 243
Погребная Д.А., 270
Поздняков С.П., 127, 141, 207, 209
Полубелова А.В., 64, 191
Поляков А.Ю., 376
Попов В.Н., 350
Потапова Е.Ю., 195
Потурай В.А., 91, 103
Пупина В.А., 352
Пушкарева О.В., 137
Пыряев А.Н., 304
Пятов В.В., 384
- Рассказов С.В., 54, 95
Расторгуев А.В., 134, 246
Редин А.А., 319
Репникова Д.А., 360
Рогов В.И., 281
Розов К.Б., 327, 352
Румынин В.Г., 327, 352
- Сабденбекова У., 339
Савельев Е.А., 372
Садиров М.Ш., 99
Сакирко М.В., 54
Сальникова Ю.И., 23, 79, 217
- Самарцев В.Н., 141
Светлаков А.А., 388
Селиверстова М.Е., 7
Семенов В.П., 235
Семенова Т.В., 217
Сентяков А.В., 315
Сергеева А.В., 270, 281
Сидорина Н.Г., 319
Смагина Т.Н., 372
Сметанина И.В., 304
Смирнов А.С., 392
Смирнов К.Д., 134, 396
Сокольников Д.С., 64
Соломатин А.В., 376
Сорокоумова Я.В., 246
Спектор С.В., 297
Ступин Е.О., 146
Сухорукова А.Ф., 356
- Тагильцев В.С., 26
Тагильцев С. Н., 26
Тарасенко И.А., 249
Толмачева Н.А., 146
Толстунов М.И., 360
Топчиева О.М., 183
Торопов А.С., 91
Трифонов Н.С., 405, 417, 421
Тудвачев А.В., 116
Турдали Б., 339
Украинцев А.В., 91, 103
Умбо С., 64
Ушаков М.В., 168
- Федоров А.А., 199
Федоров И.А., 91
Федоров М.А., 199
Филатова Е.Г., 146, 301
Филимонова Е.А., 360
Финкельштейн А.Л., 399
Фомина Я.В., 323
Формугина И.А., 281
- Хабибуллин Р.Р., 417, 421
Ханхакшинов И.Н., 146
Харитонов Н.А., 107, 266, 293
Хархордин И.Л., 143
Хархордина Е.И., 143
Хаустов А.П., 30
Хвощевская А.А., 278, 319, 346
Хендерсон Г., 64
- Чебыкин Е.П., 54, 95
Челноков Г.А., 107, 266
Черкашина Т.Ю., 87
Черных В.В., 356, 364
Чернявский М.К., 103
Чувашова И.С., 95
Чуйкина Д.И., 79
- Шагун А.Н., 262
Шайгузов Р. С., 150
Шамов В. В., 150, 409
Шепелев В.В., 203
Шкиль И.Э., 143
Шумихин В.М., 229
- Юрчик И.И., 285
- Яковлев Е.Ю., 111
Яндола Н.И., 356, 368
- Acar Y., 154
Chen C.C., 252
Du J.Q., 252
Huang Q., 207
Jiang X.W., 115
Kaçan K., 154
Liu C.M., 254
Liu F., 252
Liu S., 207
Liu Shiqi., 209
Liu Y., 115
Liu Y.L., 252
Olgun B., 154
Özdemir N., 154
Tan Y., 115
Tong J., 258
Wang L.F., 254
Wang Ninghao, 213
Wang P., 207, 254
Wang Ping, 209, 213
Wang R., 115
Ji T.T., 115
Jiang X.W., 115
Wang Sh., 258
Wang Tianye, 213
Xia J., 34
Xue Y., 34
Yu J.J., 254,
Yu J., 207
Yu Jingjie., 209
Zhu P.K., 252

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
I. ГИДРОГЕОЛОГИЯ В XXI ВЕКЕ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ	
Абукова Л.А., Селиверстова М.Е., Абдрашитова Р.Н. Геофлюидодинамические особенности глубокопогруженных углеводородных систем в пределах нефтегазоносных бассейнов (в контексте научных позиций Е.В. Пиннекера).....	7
Алексеева Л.П., Алексеев С.В., Дурбан Л.А. Определение состава рассолов различными методами. Оценка степени сходимости результатов.....	11
Аракчаа К.Д. Лечебные воды Тувы: от исследований Е.В. Пиннекера к научному направлению аржаанология.....	15
Аузина Л.И., Верховин И.И. Подготовка гидрогеологов в иркутском национальном исследовательском техническом университете: вчера, сегодня, завтра.....	19
Плавник А.Г., Сальникова Ю.И. Современные гидрогеохимические условия пластовых вод апт-альб-сеноманских отложений Западной Сибири.....	23
Тагильцев С.Н., Пачина Е.П., Тагильцев В.С. Геомеханические основы развития современной проницаемости в скальных горных породах.....	26
Хаустов А.П. Ранние гидрогеохимические исследования Е.В. Пиннекером минеральных вод Восточной Сибири.....	30
Xia J., Xue Y. China water security issue in a changing world: opportunity & challenges.....	34
II. ГИДРОХИМИЯ, ИЗОТОПИЯ, МИКРОБИОЛОГИЯ ПОДЗЕМНОЙ ГИДРОСФЕРЫ	
Брагин И.В., Павлов А.А., Александров И.А. Геохимия микроэлементов углекислых субтермальных вод Каларского хребта (Байкальская рифтовая зона).....	38
Вашурина М.В., Плавник А.Г., Гуляева Ю.В. Приоритетные факторы формирования химического состава пресных подземных вод в пределах Среднеобского бассейна.....	42
Домрочева Е.В., Король И.С., Мухортина Н.А. Органическое вещество как индикатор источников загрязнения и геохимических процессов в природных водах Кузбасса.....	46
Дребот В.В., Велюга Д.М., Домрочева Е.В. Первые данные по изотопному составу хлора ($\delta^{37}\text{Cl}$) в подземных водах угленосных районов Кузбасса.....	50
Захаренко А.С., Букин С.В., Асламов И.А., Сакирко М.В., Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Земская Т.И. Микробные сообщества подземных вод Култукского резервуара (Южный Байкал).....	54
Зиппа Е.В., Борзенко С.В. Изотопный состав и формы серы в термальных водах центральной части Байкальской рифтовой зоны.....	56
Каюкова Е.П., Петров С.В. О химическом составе природных вод платинового месторождения Кондёр (Хабаровский край).....	60
Кононов А.М., Гутарева О.С., Вакс А., Брейтенбах С.Ф.М., Хендерсон Г., Умбо С., Маргерум Д., Бокс М., Осинцев А.В., Сокольников Д.С., Даштсерен А., Нарангэрэл С. Палеоклиматические реконструкции и гидрогеохимические особенности пещер Восточной Сибири и Монголии.....	64
Лебедева Л.С. Оценка источников питания подземных вод сплошной криолитозоны Центральной Якутии по изотопным данным.....	68
Лепокурова О.Е. «Тяжелый» биогенный водорастворенный углерод ($\delta^{13}\text{C}$) в водах осадочных отложений Западной Сибири.....	71
Мухортина Н.А., Зиппа Е.В. Полициклические ароматические углеводороды в термальных водах центральной части Байкальской рифтовой зоны.....	75

Мухортина Н.А., Король И.С., Чуйкина Д.И., Сальникова Ю.И. Органические соединения подземных вод нефтегазодобывающих территорий Западной Сибири (на примере Ханты-Мансийского автономного округа).....	79
Павлов С.Х. Связь формирования инверсионных вод и минеральной зональности.....	83
Пеллинен В.А., Черкашина Т.Ю., Иванова Д.С., Пашкова Г.В. Химическая характеристика поверхностных и подземных вод береговой зоны пролива Малое Море озера Байкал.....	87
Потурай В.А., Зиппа Е.В., Украинцев А.В., Федоров И.А., Торопов А.С. Органическое вещество в горячих источниках Байкальской рифтовой зоны.....	91
Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Чувашова И.С. Структурный контроль отношений и концентраций изотопов урана в подземных водах Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий Внутренней Азии.....	95
Садиров М.Ш., Вологодина И.В., Дутова Е.М., Асочакова Е.М., Каримова Д.Б. Современные гидрогенные карбонатные минеральные новообразования в пределах северо-восточной части Колывань-Томской складчатой зоны.....	99
Украинцев А.В., Потурай В.А., Чернявский М.К. Растворенное органическое вещество в холодных источниках Баргузинской долины.....	103
Харитонов Н.А., Казак Е.С., Челноков Г.А., Карабцов А.А., Асеева А.В., Лаврушин В.Ю. Изотопный состав кислорода ($\delta^{17}\text{O}$, $\delta^{18}\text{O}$) и водорода (δD) водной компоненты грязевых вулканов Западно-Кубанского прогиба: экспериментальные исследования.....	107
Яковлев Е.Ю., Дружинин С.В., Зыков С.Б. Радиационные особенности некоторых типов подземных вод Ленинградской области и южной части Республики Карелия.....	111
Jiang X.W., Wang R., Ji T.T., Tan Y., Liu Y. Mechanisms driving hydrochemical evolution from $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ -dominated to $\text{HCO}_3\text{-Na}$ -dominated groundwater in two aquifers of the Ordos Basin, NW China.....	115
III. ГИДРОГЕОДИНАМИКА И РЕСУРСЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД	
Виноград Н.А., Тудвачев А.В. Учет вопросов охраны подземных вод в рамочной классификации ресурсов ООН.....	116
Владимиров К.В. Опыт оценки подземного стока водосборов малых рек методом расчленения гидрографа.....	119
Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Петухова С.М. Особенности формирования режима подземных вод центральной части Московского артезианского бассейна (на примере полигона ИДГ РАН «Михнево»).....	123
Гриневский С.О., Поздняков С.П., Григорьев В.Ю., Лехов В.А. Климатические и гидрогеологические факторы региональной изменчивости подземного стока на европейской территории России.....	127
Егоров Т.С., Дубровин К.А., Козлов Ю.А. Количественная оценка подземного стока арктических территорий в условиях ограниченной изученности.....	130
Неуважаев Г.Д., Петрова Д.В., Озерский Д.А., Смирнов К.Д., Блохин П.А., Расторгуев А.В. Оценка фильтрационных свойств трещиноватых пород на участке Енисейском по данным опытно-фильтрационных работ.....	134
Озерский А.Ю., Пушкарева О.В., Караулов В.А., Панов Е.А. Особенности верхнего гидрогеодинамического пояса в массиве архейских кристаллических пород на Енисейском кряже.....	137
Поздняков С.П., Гриневский С.О., Самарцев В.Н., Лехов В.А., Ван Пин. Региональная оценка подземного стока европейской части России по данным конца XX-начала XXI века.....	141
Хархордин И.Л., Шкиль И.Э., Хархордина Е.И., Назима В.В. Использование горизонтальных скважин для снижения напоров в Прибортовом массиве: натурные наблюдения и численное моделирование.....	143

Ханхакшинов И.Н., Зелинская Е.В., Барахтенко В.В., Филатова Е.Г., Монхороева Л.М., Толмачева Н.А., Ступин Е.О. Перспективы извлечения лития из гидроминеральных ресурсов Сибирской платформы.....	146
Шайгузов Р.С., Шамов В.В. Статистическая оценка времени транзита подземных вод в трансграничное озеро Ханка (Приморский край РФ).....	150
Acar Y., Kaçan K., Olgun B., Özdemir N. Seasonal investigation of freshwater resources feedings Gökova bay (Mugla-Turkey).....	154

IV. ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ В РЕГИОНАХ С КОНТРАСТНЫМИ ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫМИ И КЛИМАТИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ

Баишев Н.Е., Огонеров В.В., Данзанова М.В. Химический состав и генезис наледей в зоне автодороги «Лена» (участок Невер – Томмот).....	156
Гагарин Л.А., Николаева Е.С. Современное распространение наледей подземных вод на Алдано-Тимптонском междуречье.....	160
Гайдукевич В.А., Павлова Н.А., Полубелова А.В. Особенности гидрогеологических условий бассейна реки Нера в Оймяконском районе Республики Саха (Якутия).....	164
Глотов В.Е., Ушаков М.В. Роль сезонноталого слоя в формировании стока горных рек северо-востока России в период зимней межени.....	168
Глотов В.Е. Тектонический контроль современных геокриологических особенностей Анадырского нефтегазоносного бассейна.....	172
Горохова Н.Б. Уровенный режим подземных вод подруслового талика в среднем течении реки Лены (Центральная Якутия).....	176
Иванова Л.Д. Надмерзлотные воды сезонноталого слоя и таликовые воды смешанного питания Восточной Якутии.....	179
Калачева Е.Г., Волошина Е.В., Топчиева О.М. Формирование холодных щелочных вод в условиях современной серпентинизации (на примере Солдатских источников, Камчатка).....	183
Макаров В.Н., Павлова Н.А., Маркова С.А. Роль снежного покрова в питании надмерзлотных вод.....	187
Полубелова А.В., Огонеров В.В., Ефремов В.С. Гелиотермальные озера на участке разгрузки холодных подземных рассолов в Кемпендяйской впадине.....	191
Потапова Е.Ю. Типизация месторождений пресных подземных вод межгорных впадин Забайкалья и Прибайкалья.....	195
Федоров М.А., Павлова Н.А., Федоров А.А. Субаквальная разгрузка подмерзлотных вод в подруслового талика р. Вилюй на границе Ыгыаттинской впадины и Сунтарского свода.....	199
Шепелев В.В. Оценка условий образования и режима источников промерзания.....	203
Liu S., Wang P., Yu J., Pozdniakov S.P., Kazak E.S., Huang Q. Surface–water fingerprints of groundwater mobilization under permafrost thaw.....	207
Wang Ping, Liu Shiqi, Yu Jingjie, Pozdniakov S.P. Increasing role of groundwater in cold-region hydrological processes under a warming climate.....	209
Wang Tianye, Wang Ninghao, Wang Ping. Permafrost state determines the non-uniform response of river runoff to climate warming.....	213

V. ПОДЗЕМНАЯ ГИДРОСФЕРА В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕНЕЗА

Абдрашитова Р.Н., Сальникова Ю.И., Ковяткина Л.А., Семенова Т.В. К вопросу о природе гидрогеохимических аномалий нефтяных месторождений Западно-Сибирского мегабассейна.....	217
Верхотуров А.Г. Надмерзлотные воды Удоканского гидрогеологического массива.....	221
Данзанова М.В., Баишев Н.Е., Огонеров В.В. Динамика уровня режима и химического состава надмерзлотных криопэгов в годовом цикле (г. Якутск).....	225

Дедюлин И.Н., Василевский П.Ю., Шумихин В.М. Физико-химическое термодинамическое моделирование закисления рудоносного пласта на Добровольном месторождении.....	229
Максимович Н.Г., Мизев А.А., Березина О.А., Деменев А.Д. Перспективы извлечения редкоземельных элементов из изливов кислых шахтных вод Кизеловского угольного бассейна.....	232
Мисайлов И.Е., Семенов В.П. Оценка влияния закачки дренажных рассолов на тепловое состояние криолитозоны (участок Октябрьский, Северо-Западная Якутия) на основе геотермического подхода.....	235
Мусин Р.Х., Галиева А.Р. Роль геологической среды в формировании экологически безопасных условий функционирования крупных промышленных предприятий (на примере нефтеперерабатывающей промзоны в Татарстане).....	239
Плюснин А.М., Гарипова Е.Р. Взаимодействие подземных и поверхностных вод на территории Джидинской природно-техногенной системы.....	243
Сорокоумова Я.В., Расторгуев А.В. Моделирование миграции растворенных в подземных водах загрязняющих веществ на территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината.....	246
Тарасенко И.А. Геохимия угольных бассейнов: от экологических проблем к новым ресурсным возможностям.....	249
Chen C.C., Zhu P.K., Liu Y.L., Liu F., Du J.Q. The influence of rainfall intensity on the migration processes of polycyclic aromatic hydrocarbons with different forms in the vadose zone.....	252
Yu J.J., Wang L.F., Wang P., Liu C.M. From expansion to recovery: groundwater depression cones in the North China Plain.....	254
Wang Sh., Tong J. Simulating PFAS transport in a vadose zone using an ensemble Kalman filter with a modified HYDRUS-1D model.....	258
VI. МИНЕРАЛЬНЫЕ, ТЕРМАЛЬНЫЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ	
Бадминов П.С., Аракчаа К.Д., Оргильянов А.И., Ескин А.Ю., Шагун А.Н., Крюкова И.Г. Тарыские источники термальных вод (Республика Тыва): состояние и перспективы использования.....	262
Барановская Е.И., Харитонов Н.А., Челноков Г.А. Гидрогеохимические условия формирования минеральных вод Иссык-Кульского межгорного артезианского бассейна	266
Вахромеев А.Г., Данилова М.А., Демидова Е.В., Левин А.В., Мисюркеева Н.В., Кирюхин А.В., Сергеева А.В., Квачко С.К., Погребная Д.А., Горохов А.П. К концепции глубинного магматогенного источника РЗЭ и лития в промышленных рассолах Сибирской платформы.....	270
Голубев В.А. Гидротермальные системы, оледенения и перспективы поисков месторождений термальных вод в Прибайкалье.....	274
Гусева Н.В., Запригалова В.А., Хвощевская А.А. Особенности поведения лития в подземных рассолах.....	278
Данилова М.А., Вахромеев А.Г., Левин А.В., Губин И.А., Сергеева А.В., Корзун А.В., Лыков Р.С., Мешкова А.В., Рогов В.И., Горохов А.П., Формугина И.А. Формирование перспективных объектов промышленных литиевых редкометалльных рассолов в результате влияния траппового магматизма на Сибирской платформе.....	281
Зарубов М.С., Данилова М.А., Юрчик И.И., Ишков А.А. Химический состав и условия залегания рассолов рифейского водоносного комплекса в пределах северной части Камовского свода.....	285
Калачева Е.Г., Волошина Е.В. Пущинские источники углекислых термальных вод (Камчатка): химический состав и ресурсный потенциал.....	289
Корзун А.В., Харитонов Н.А., Барановская Е.И. Микрокомпоненты в пластовых водах соленосных регионов Прикаспийской впадины.....	293

Котович А.Д., Спектор С.В. Результаты специального гидрогеологического районирования теплоэнергетических подземных вод Камчатки	297
Монхороева Л.М., Филатова Е.Г., Зелинская Е.В. Сорбционное извлечение лития из рассолов нефтегазоконденсатного месторождения.....	301
Оргильянов А.И., Крюкова И.Г., Аракчаа К.Д., Пыряев А.Н., Бадминов П.С., Сметанина И.В. Сульфидные воды Тувы.....	304
Павленко О.Л., Курочкин В.Ю. Рекреационное использование минеральных вод Тюменской области. Проблемы и перспективы.....	308
Петров В.В. К вопросу об оценке и учете прогнозных ресурсов категории Р ₃ полезных химических элементов попутных жидких руд при создании Госгеолкарт масштаба 1:1 000 000 – 200 000.....	311
Сентяков А.В., Васильев Д.М., Акзигитов Н.И. Подземное выщелачивание – новое решение для ускоренного ввода в опытно-промышленную эксплуатацию Томторского месторождения ниобия и редких земель.....	315
Сидорина Н.Г., Джабарова Н.К., Коханенко А.А., Коваленко Т.С., Редин А.А., Хвощевская А.А. Современное состояние лечебной гидроминеральной базы курорта федерального значения «Белокуриха».....	319
Фомина Я.В. Актуальные задачи недропользования в области гидроминерального сырья.....	323

VII. КАЧЕСТВО И ОХРАНА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Вилькина М.В., Румынин В.Г., Никуленков А.М., Розов К.Б., Гембель Л.Р., Ереев Д.А. Исследование аномального транспорта радионуклидов в трещиноватых водоносных массивах (в связи проблемой захоронения радиоактивных отходов в геологических формациях).....	327
Дульцев Ф.Ф. Радиологическая характеристика природных вод восточных районов Новосибирской области.....	331
Новиков Д.А. Роль растворенного органического вещества в загрязнении питьевых подземных вод юга Западной Сибири.....	335
Завалей В.А., Новиков Д.А., Турдали Б., Жинак К., Сабденбекова У., Заиров Ж. Облучение населения растворенным радоном (на примере Восточного Казахстана).....	339
Козлов Ю.А., Егоров Т.С. Картографическое моделирование гидрографической сети для оценки защищенности подземных вод в условиях криолитозоны.....	343
Новиков Д.А., Хвощевская А.А., Бежин Н.А. Уран и торий в природных водах Крымского полуострова.....	346
Попов В.Н. Гидрогеологические аспекты определения размеров округов горно-санитарной охраны месторождений минеральных вод.....	350
Розов К.Б., Румынин В.Г., Пупина В.А., Вилькина М.В., Никуленков А.М., Гембель Л.Р. Влияние коллоидных частиц на динамику переноса радионуклидов в условиях пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов.....	352
Сухорукова А.Ф., Яндола Н.И., Черных В.В. Проблемы питьевого водоснабжения правобережья р. Оби (восточная часть Новосибирской области).....	356
Филимонова Е.А., Репникова Д.А., Толстунов М.И. Загрязнение родниковых вод юго-западной части Крымского полуострова микрочастицами пластика.....	360
Черных В.В. Загрязнение родниковых вод восточных районов Новосибирской области химическими элементами I класса опасности.....	364
Яндола Н.И. Мышьяк в подземных водах восточной части Новосибирской области	368

VIII. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аксеновская А.А., Смагина Т.Н., Савельев Е.А. Особенности гидрогеологического моделирования планово-изолированных пластов в условиях криолитозоны на примере водозабора в Республике Саха (Якутия).....	372

Кириухин А.В., Соломатин А.В., Поляков А.Ю., Лемзиков М.В., Бурнайкин Д.Н. Реакция геофлюидных систем на землетрясение $M_w = 8.8$ на Камчатке (29.07.2025 г.)	376
Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеологические эффекты в ближней зоне Камчатского мегаземлетрясения 29 июля 2025 г., $M_w = 8.8$ (по данным прецизионных наблюдений в скважинах).....	380
Пятов В.В., Дубровин К.А. Комплексное применение данных ДЗЗ для выявления региональных гидрогеологических особенностей территории в области криолитозоны....	384
Светлаков А.А., Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Добрынина А.А., Балобаненко А.А. Гидрогеосейсмические исследования Байкальской природной территории в 2016–2020 гг.	388
Смирнов А.С. Роль гидрогеологических исследований при изучении водонасыщенных пластов на Ковыктинском ГКМ.....	392
Смирнов К.Д., Новиков К.А., Капырин И.В. Комплексная трехмерная модель поверхностного и подземного стока в программном комплексе GeRa.....	396
IX. ПОДЗЕМНАЯ ГИДРОСФЕРА ГЛАЗАМИ МОЛОДЫХ ГИДРОГЕОЛОГОВ	
Горбунова М.П., Пашкова Г.В., Финкельштейн А.Л. Особенности определения основных элементов в рассолах с использованием разных вариантов рентгенофлуоресцентного анализа.....	399
Дабу Н., Ильин А.В., Абрамов В.Ю. Результаты 30-летнего мониторинга влияния системы обратной закачки на подземные воды Мирнинского района (1990–2022 гг.).....	402
Касимов Ж.Д., Трифонов Н.С., Кудряшова Л.К. Палеогеографические и палеотектонические реконструкции апт-альб-сеноманских отложений в пределах Варьеганского мегавала.....	405
Паламарчук В.А., Лебедева Л.С., Павлова Н.А., Шамов В.В. Факторы пространственной дифференциации химического состава родниковых вод урочища Пески (Забайкалье): оценка по данным 2022–2025 гг. с применением статистических методов.....	409
Пашагин А.В., Дутова Е.М., Людвиг В.М. Отстойники карьерных вод как источники загрязнения подземной гидросферы в Кузбассе.....	413
Хабибуллин Р.Р., Касимов Ж.Д., Трифонов Н.С., Кудряшова Л.К., Мартынова С.А., Колубаева Ю.В. Комплексная оценка фильтрационно-емкостных свойств верхнеальб- сеноманского водоносного горизонта на Талинском участке недр.....	417
Хабибуллин Р.Р., Колубаева Ю.В., Трифонов Н.С. Оценка совместимости пластовых и закачиваемых вод на территории Талинского участка недр Краснотенинского нефтегазоконденсатного месторождения.....	421
Wan X.Y., Cheng S.Y., Wang H. X., Zhang R. Yin Y.C., Li X.J. Analysis of spatiotemporal differences in shallow groundwater response to extreme precipitation in the beijing plain.....	425
Авторский указатель.....	425

Научное издание

Подземная гидросфера

Материалы Международного совещания по подземным водам востока России

Утверждено к печати Ученым советом ИЗК СО РАН (протокол № 6 от 07.05.2026 г.)

Фото на обложке (автор Л.П. Алексеева):

Лицевая и обратная сторона: Склоновая наледь, правобережье р. Сенца, Окинское плато, Восточный Саян, 2018 г. На обратной стороне – Сергей Владимирович Алексеев, д.г.-м.н., заведующий лабораторией гидрогеологии ИЗК СО РАН с 2001 по 2025 г., председатель и научный руководитель Всероссийского совещания по подземным водам востока России с 2012 г.

Литературные редакторы *Н.Г. Балукова, Е.А. Балукова*
Технические редакторы *Л.П. Алексеева, А.А. Светлаков*
Компьютерная верстка *Л.П. Алексеевой*

Подписано к печати 07.05.2026. Формат 60х84/8. Гарнитура «Таймс».

Печать RISO. Усл. печ. л. 50.3 Тираж 120. Заказ № 480.

Отпечатано в Институте земной коры СО РАН. 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128.