

На правах рукописи

КОНОНОВ Александр Матвеевич

**СОЛЁНЫЕ ВОДЫ И РАССОЛЫ ОЛЕНЁКСКОГО
КРИОАРТЕЗИАНСКОГО БАСЕЙНА**

25.00.07 – гидрогеология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2009

Работа выполнена в Институте земной коры Сибирского отделения
Российской академии наук

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук
Сергей Владимирович Алексеев

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук
Игорь Сергеевич Ломоносов

кандидат геолого-минералогических наук
Юрий Николаевич Диденков

Ведущая организация: Ордена Трудового Красного Знамени Институт
мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

Защита состоится 19 ноября 2009 г. в 14:00 ч. на заседании диссертационного
совета Д 003.022.01 в Институте земной коры СО РАН по адресу: 664033,
Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Иркутского научного
центра СО РАН в здании Института земной коры СО РАН.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения,
просим направлять по указанному адресу ученому секретарю совета к.г.-м.н.
Людмиле Павловне Алексеевой.

Тел: (3952) 42-27-77, fax: (3952) 42-69-00, 42-70-00, e-mail: lalex@crust.irk.ru

Автореферат разослан 12 октября 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук

Л.П. Алексеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Оленёкский криоартезианский бассейн расположен в Западной Якутии на северо-востоке Сибирской платформы. Осадочные толщи и кимберлитовые тела в его пределах вмещают хлоридные солёные воды и рассолы различного катионного состава и минерализации. Генезис подземных вод этого типа представляет собой крупную научную проблему. Одним из ключевых ее аспектов является взаимодействие компонентов в системе «вода-порода-газ-органическое вещество» под влиянием природных и техногенных факторов.

Геологическое строение Оленёкского криоартезианского бассейна характеризуется литолого-фациальной неоднородностью. Наличие в пределах бассейна соленосных, нормально-морских и рифогенных толщ предопределило особые условия седиментации, диагенеза и катагенеза, однако их влияние на геохимические особенности соленых вод и рассолов бассейна практически не изучено. Углубление знаний о факторах и процессах формирования состава минерализованных подземных вод позволит найти подходы к пониманию общих закономерностей эволюции подземной гидросферы.

Отличительной особенностью Оленёкского криоартезианского бассейна является то, что верхняя часть геологического разреза проморожена до глубины 600 м, а мощность криолитозоны, не имеющей аналогов в мире, достигает 1450 м. Многие аспекты становления криолитозоны с её уникальными параметрами являются предметом обсуждения среди специалистов различного профиля. Особый научный интерес представляет влияние многолетнего промерзания и глубокого охлаждения земных недр на формирование состава подземных вод криолитозоны.

Выбор Оленёкского криоартезианского бассейна в качестве объекта исследований связан и с тем, что в его пределах проводятся поиски, разведка и разработка месторождений алмазов, а также других полезных ископаемых, строятся крупные промышленные объекты – фабрики, шахты, карьеры. В этой связи результаты исследований по рассматриваемой проблеме могут найти конкретное практическое применение.

Цель работы – реконструкция основных этапов формирования солёных вод и рассолов Оленёкского криоартезианского бассейна.

Основные задачи, поставленные для достижения цели:

- 1 – определить характер преобразования соленых вод и рассолов в ходе палеозойского осадочного процесса;
- 2 – выявить ключевые процессы, определившие формирование основных параметров криолитозоны;
- 3 – провести типизацию разреза осадочного чехла по мерзлотно-гидрогеологическим условиям с учетом его литолого-фациальной неоднородности;
- 4 – рассмотреть процессы фракционирования изотопов в соленых водах и рассолах и определить их роль в формировании состава подземных вод.

Методы исследований определялись современными представлениями о формировании солёных вод и рассолов как части системы «вода-порода-газ-органическое вещество».

Для решения поставленных задач применялся комплекс методов, направленных на изучение роли осадочного процесса в формировании соленых вод и рассолов Оленёкского бассейна. Широко использовался сравнительно-литологический метод, в основе которого лежат актуалистический и историко-геологический подходы, позволившие реконструировать процессы миграции и концентрации химических элементов в различных обстановках. Применялись палеогеографические, литолого-фациальные и тектонические построения, позволившие выделить основные этапы осадочного процесса.

Поскольку преобразование компонентов системы «вода-порода-газ-органическое вещество» тесно связано с отдельными этапами осадочного процесса, использовался литогидрогеохимический метод исследований, включавший сопоставление современных мерзлотно-гидрогеологических и геохимических параметров Оленёкского бассейна с составом пород разнофациальных зон и анализ распределения вторичных минералов и условий их образования.

В комплексе аналитических исследований производилось определение компонентов, находящихся на различных уровнях организации – атомарном, минеральном, породно-фациальном. Изучался состав соленых вод и рассолов, расплавов текстурообразующих подземных льдов, а также горных пород. При этом использовались методы атомной абсорбции, спектральной фотометрии, хроматографии. В лабораториях Страсбургского Университета (Франция) и Университета Ватерлоу (Канада) проводилось определение изотопного состава подземных вод и горных пород. В полевых условиях определялись их pH, величина минерализации, температура.

Процессы криогенной метаморфизации состава солёных вод и рассолов изучались с использованием программного комплекса FREZCHEM2, разработанного в лаборатории CRREL (США).

При изучении геологического строения и мерзлотно-гидрогеологических условий Оленёкского бассейна использовались полевые материалы автора, обобщенные данные региональных, поисковых и разведочных работ, глубокого опорного бурения, режимных гидрогеологических и геотермических наблюдений.

Научная новизна работы. Данная работа представляет собой исследование солёных вод и рассолов, распространенных в пределах Оленёкского бассейна – уникальной криогидрогеологической системы севера Сибирской платформы. Полученные автором основные результаты и их ценность заключаются в следующем:

1. Рассмотрены основные этапы осадочного процесса, на которых происходило изменение параметров системы «вода-порода-газ-органическое вещество» и охарактеризованы ведущие процессы формирования состава

солёных вод и рассолов. Проведенная работа вносит определенный вклад в решение важнейшей научной проблемы - генезиса хлоридных рассолов.

2. Выделены литолого-фациальные и гидрогеологические параметры осадочного чехла бассейна, определившие особенности эволюции и современное состояние криолитозоны.

3. Впервые выполнена типизация разреза осадочного чехла по мерзлотно-гидрогеологическим условиям с учетом его литолого-фациальной неоднородности.

4. Исследован изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{37}\text{Cl}$, $\delta^{81}\text{Br}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) солёных вод, рассолов и вмещающих горных пород и охарактеризованы процессы фракционирования изотопов растворителя и растворенных компонентов.

Исходные материалы и вклад автора в решение проблемы. В работе использовались результаты полевых, теоретических и экспериментальных исследований, проводимых лабораторией гидрогеологии ИЗК СО РАН, и в ее составе лично автором и при его непосредственном участии. Изучение соленых вод и рассолов проводилось в рамках ежегодных экспедиционных проектов СО РАН, международного проекта PICS-2650 «Mécanismes et bilans d'altération en climats froids: étude du système hydrologique du Baïkal», при финансовой поддержке РФФИ (проекты: 04-05-64426, И, 08-05-00086, И; 04-05-22000-НЦНИ, И), а также в составе ведущей научной школы России (гранты НШ-9542.2006.5 и НШ-3561.2008.5).

Практическое значение работы. Проведённая типизация мерзлотно-гидрогеологического разреза Оленёкского бассейна позволит оптимизировать региональные исследования на севере Сибирской платформы и может явиться основой для разработки новых схем мерзлотно-гидрогеологического районирования, необходимость создания которых диктуется активным поиском и освоением месторождений алмазов на слабоизученных в гидрогеологическом и геокриологическом отношении территориях.

Апробация работы. Основные результаты исследования и защищаемые положения диссертации докладывались и обсуждались на различных молодежных конференциях, Всероссийских совещаниях и Международных конференциях: Научно-техническая конференция Иркутского государственного технического университета, г. Иркутск, 2000, 2001, 2003, 2009 гг.; Международный научный симпозиум студентов, аспирантов и молодых ученых имени академика М.А. Усова, Томский политехнический университет, г. Томск, 2002 г.; Молодежная конференция "Гидроминеральные ресурсы Восточной Сибири", Иркутский государственный технический университет г. Иркутск, 2004 г.; XXI и XXII Всероссийская молодежная конференция "Строение литосферы и геодинамика" Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, 2005, 2007, 2009 гг.; XVIII и XIX Всероссийское совещание по подземным водам востока России. г. Иркутск, 2006 г. и Тюмень, 2009 г.; III Сибирская международная конференция молодых ученых по наукам о Земле, Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск, 2006 г.; Российская научная

конференция «Гидрогеохимия осадочных бассейнов». Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Томск, 2007 г.; Международная конференция «Криогенные ресурсы полярных регионов», г. Салехард, 2007 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ в трудах российских, международных конференций, совещаний и рецензируемых журналах, в том числе одна статья в журнале из Перечня ВАК (Геология и геофизика).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Общий объем работы составляет 248 страниц текста, 49 рисунков, 31 таблица. В списке литературы содержится 320 наименований.

Подготовка и работа над диссертацией осуществлялась под научным руководством д.г.-м.н. С.В. Алексеева. В ходе работы были получены ценные советы и критические замечания кандидатов геол.-мин. наук Л.П. Алексеевой, В.Н. Борисова, С.С. Сухова, А.В. Дроздова, С.Х. Павлова, Ю.И. Кустова, А.С. Гладкова.

Организация и проведение полевых исследований проходили при помощи геологических служб АК «АЛРОСА» в лице В.В. Бульдовича, С.В. Басько, О.Е. Васильчиковой, Л.П. Горюновой, А.В. Дроздова, Т.И. Дроздовой, А.Т. Илькова, К.М. Константинова, А.И. Миненкова, Г.Н. Рудаковой, М.А. Карпенко, Г.П. Шмарова, а также сотрудников лаборатории ИЗК СО РАН А.А. Стуленя, А.М. Хардиной, А.В. Чуприкова, П.А. Шолохова. Аналитические работы выполнялись специалистами-гидрохимиками Л.А. Дурбан, А.Г. Томиловой, Т.Ф. Даниловой. Перечисленным лицам автор выражает огромную благодарность и признательность.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Положение первое: *Геохимические особенности солёных вод и рассолов Оленёкского бассейна определяются главным образом первичными литолого-фациальными условиями осадконакопления и совокупностью преобразований в системе «вода-порода-газ-органическое вещество» на последующих этапах диагенеза, катагенеза, гипергенеза, криогенеза.*

Проблема генезиса соленых вод и рассолов Оленёкского бассейна рассматривается в работах С.В. Алексеева, Л.П. Алексеевой, А.А. Анциферова, Е.А. Баскова, В.Н. Борисова, М.Б. Букаты, А.А. Дзюбы, Е.В. Пиннекера, С.Л. Шварцева, и др. В целом исследования подтверждают гипотезу об испарительном концентрировании древних морских вод в бассейнах эвапоритизации и последующей их метаморфизации, а также смешения с водами другого генезиса (инфильтрационными, магматогенными). Мерзлотно-гидрогеологические особенности бассейна с достаточной степенью детальности освещены В.И. Балобаевым, В.И. Вожовым, С.П. Готовцевым, И.В. Климовским, Р.С. Кононовой, Н.Н. Романовским, О.Н. Толстихиным, С.М. Фотиевым, В.В. Шепелевым и др.

Несмотря на значительные успехи в познании генезиса подземных рассолов бассейна, в настоящее время остается много нерешенных вопросов. Одним из них является образование крепких и весьма крепких хлоридных кальциевых рассолов в рифогенных карбонатных породах центральной и юго-западной части, а также слабых и крепких рассолов на северо-востоке бассейна. Автор настоящей работы предпринял попытку рассмотреть формирование подземных вод разнофациальных зон бассейна, преобразующихся в системе «вода-порода-газ-органическое вещество» на различных этапах осадочного процесса (литогенеза).

В ходе исследования было установлено, что различие геохимических параметров подземных вод бассейна во многом определялось исходными литолого-фациальными условиями осадконакопления. Уже в нижнем кембрии большая часть территории Оленёцкого бассейна была занята Юдомо-Оленёцким морским бассейном нормальной солёности, а на юго-западе и в центральной части были широко распространены барьерные рифовые постройки Анабаро-Синского комплекса, ограничивающие крупный Турухано-Иркутско-Олекминский солеродный бассейн и небольшие межрифовые лагуны (Нижний палеозой..., 1987, Сухов и др., 2007). Рифогенные структуры ослабляли гидродинамику в межрифовых бассейнах, что на фоне аридного климата приводило к эвапоритизации. В это же время в нормально-морских бассейнах отлагались конденсированные осадки незначительной мощности. Во второй половине среднего кембрия районы эвапоритовых бассейнов трансформировались в прибрежные сабхи, а в нормально-морских бассейнах активизировалось накопление терригенно-карбонатных отложений. В верхнем кембрии и ордовике они преобразовались в шельфы и прибрежные равнины. Различие условий осадконакопления в нижнем палеозое обусловило образование поровых вод различного состава и минерализации. Так в нормально-морских отложениях накапливались растворы, близкие к морским водам, а в эвапоритах солеродных бассейнов концентрировалась рапа.

Наличие особых гидрогеохимических обстановок в бассейнах седиментации предопределило специфику диагенетических преобразований. В нормально-морских отложениях развивались типичные процессы восстановительного диагенеза. При этом происходила метаморфизация иловых вод, связанная с деятельностью сульфатредуцирующих бактерий и преобразованием органического вещества. Иловые воды изменялись по составу, обеднялись сульфатами, обогащались кальцием, магнием и многими микроэлементами (Br, J, F и др.).

Диагенетические преобразования в рифогенных карбонатах определялись положением рифов относительно водной поверхности и существенно влияли на коллекторские свойства. В подводных условиях поры и пустоты построек активно заполнялись карбонатным цементом. В субаэральных условиях развивались процессы выщелачивания карбонатов атмосферными осадками. Рапа солеродных лагун проникала в пористые

рифогенные карбонаты и приводила к их доломитизации, перекристаллизации, при этом обогащаясь кальцием и стронцием.

В соленосных толщах рапа также претерпевала значительные изменения. Высокая пористость солей, достигающая 10-30%, способствовала миграции рапы, которая при этом участвовала в перекристаллизации солей, сопровождавшейся очищением их от примесей в виде соосажденных с солями микроэлементов. Перекристаллизация солей способствовала метаморфизации рапы и накоплению в ней Br, J, Li, Rb. В пределах сабховых побережий развивались характерные процессы засоления песков, что приводило к увеличению минерализации грунтовых вод до 300 г/дм³ и концентрированию в них хлоридов магния.

Катагенетические преобразования подземных вод охватывали наиболее длительный этап осадочного процесса, включающий формирование водоносных горизонтов и комплексов, а также преобразование системы «вода-порода-газ-органическое вещество» за счет миграции отдельных её компонентов, изменения температуры и давления погружающихся толщ. Различие катагенетических процессов во многом определялось литолого-фаціальными особенностями и составом осадочных пород.

Преобразование подземных вод, сосредоточенных в породах нормально-морского типа, было сопряжено с уплотнением глинистых разностей и формированием в карбонатах коллекторов трещинного типа, их доломитизацией, окремнением, кальцитизацией пустот и трещин. При взаимодействии с вмещающими породами подземные воды обогащались Ca, Li, Rb и другими компонентами.

В соленосных отложениях усилилось элизионное отжатие рассолов в подсолевые, межсолевые и околоэвапоритовые толщи (Махнач, 1989). Процессы миграции рассолов в рифогенные карбонаты также способствовали развитию доломитизации и галакатагенетического минералообразования. В свою очередь, они сопровождались метаморфизацией рассолов по Ca и Sr.

В глубоко погруженных частях крупных тектонических депрессий происходило преобразование органического вещества и миграция углеводородов в сводовые структуры Анабарской антеклизы (Геология нефти и газа..., 1981). Катагенетические процессы активно протекали в ходе внедрения трапповых интрузий и кимберлитов, которое сопровождалось перетоками и разгрузкой рассолов, перераспределением ресурсов подземных вод и углеводородов. При внедрении гидротермальных растворов существенно смещались карбонатные равновесия и открывались новые возможности для минералообразования. В этой обстановке активно развивались процессы метаморфизации органического вещества, обусловившие переход в раствор I, Br, CO₂, органических кислот и соединений (Шварцев, 2005). Проявление древней разгрузки рассолов в ходе тектоно-магматических событий подтверждается широким распространением метаморфизованных битумоидов, образующих в пределах Оленёкского бассейна одну из крупнейших в мире провинций.

Общее поднятие Сибирской платформы в триасе существенно сократило области осадконакопления и обусловило формирование инфильтрационных систем. В пределах Оленёкского бассейна образовалась зона свободного водообмена, развитие которой привело к опреснению подземных вод верхней части разреза. Относительно небольшие превышения в рельефе и наличие литологических водоупоров способствовали хорошей сохранности солёных вод и рассолов зоны затрудненного водообмена.

Начавшееся в позднем кайнозое похолодание сопровождалось активным промерзанием зоны свободного водообмена и глубоким охлаждением недр. При промерзании происходила криогенная метаморфизация подземных вод, в ходе которой льдообразование приводило к концентрированию остаточных растворов и изменению их состава (Алексеев, 2000). Проведённое нами моделирование криогенной метаморфизации состава солёных подземных вод с помощью программы FREZCHEM2 позволило выделить четыре стадии процесса: 1) охлаждение при температуре от 0 до -1.5°C (без изменения состава); 2) концентрирование при температуре от -1.5 до -14.5°C (интенсивная кристаллизация воды и рост минерализации остаточного раствора); 3) десульфатизация при температуре от -14.5 до -30°C (медленная кристаллизация воды, образование мирабилита и хлоридного раствора); 4) осаждение кристаллогидратов хлоридных солей, сокращение объема и содержания натрия, магния и калия раствора при температуре от -30 до -54°C . Результаты моделирования свидетельствуют о том, что в наибольшей степени криогенезу подвергались слабые рассолы, а крепкие только охлаждались. Формирование криолитозоны мощностью до 1450 м происходило в породах с высокой теплопроводностью и в условиях низкого внутриземного теплового потока (Балобаев, Девяткин, 1983). Неглубокое залегание криопэгов способствовало конвективному привносу холода в недра Оленёкского бассейна.

Ведущие процессы формирования подземных вод на всех этапах литогенеза, а также степень охлаждения разреза и его гидрогеологические условия существенно отличались благодаря неоднородности литолого-фациальных параметров осадочных пород в пределах бассейна. Это заключение позволило автору прийти ко второму защищаемому положению.

Второе положение: *В пределах Оленёкского криоартезианского бассейна выделяются три типа разреза – Турухано-Иркутско-Олёкминский, Юдомо-Оленёкский, Анабаро-Синский, резко различающиеся геологическим строением, степенью охлаждения пород, фильтрационными параметрами и качеством подземных вод.*

Турухано-Иркутско-Олекминский разрез характеризуется наличием соленосных отложений галогенно-сульфатно-карбонатного состава на юго-западе Оленёкского бассейна (рис. 1). Породы проморожены до глубины 200-400 м. Мощность криолитозоны не превышает 860 м. Надмерзлотные воды скапливаются в сезонно-талом слое и в подрусловых таликах крупных рек. Широко распространены межмерзлотные линзы и горизонты подземных солёных вод сульфатно-хлоридного натриево-кальциевого состава с

минерализацией до 13 г/дм^3 и хлоридного натриевого – с минерализацией до 32 г/дм^3 . Температура криопэггов изменяется от -2.5 до $-0.5 \text{ }^\circ\text{C}$. Дебит скважин составляет $8.6\text{--}17.3 \text{ м}^3/\text{сут}$. Наличие соленосных отложений определяет особенности гидрогеологического строения юго-западной части бассейна. Относительно соленосной толщи здесь вскрываются надсолевой, межсолевой и подсолевой водоносные комплексы. Надсолевой нижне-среднекембрийский водоносный комплекс выделен в подмерзлотной части разреза, вмещающей хлоридные натриевые солёные воды и рассолы с температурой $-2.3 - 0 \text{ }^\circ\text{C}$. Открытая пористость коллекторов изменяется от 1 до 19 %. Дебит скважин при понижении 131-197 м варьирует в пределах $52\text{--}242 \text{ м}^3/\text{сут}$. Минерализация подземных вод изменяется от 34 до 300 г/дм^3 . Характерной особенностью этих вод является невысокое содержание микрокомпонентов: брома – до 0.004, стронция – до 0.04, лития – до 0.001 г/дм^3 .

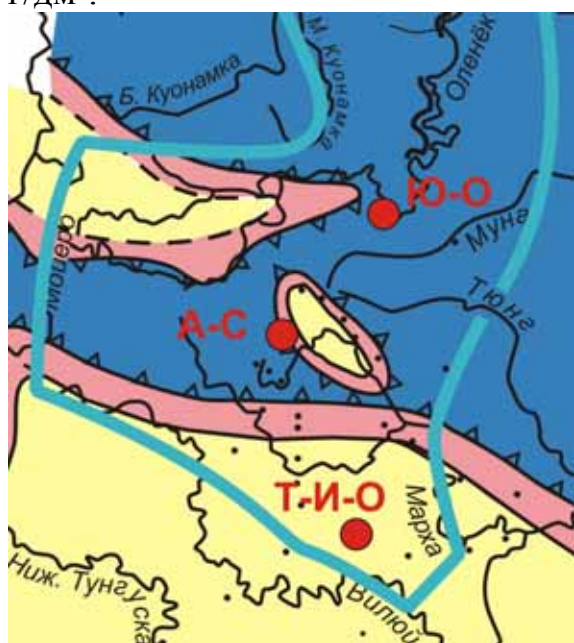


Рис. 1. Положение опорных мерзлотно-гидрогеологических разрезов в пределах Оленёкского криоартезианского бассейна.

Палеогеография бассейна в нижнем и среднем кембрии (Sukhov, 1997; Сухов и др., 2007).

- Солеродные бассейны
- Нормально-морские бассейны
- Рифогенные комплексы
- Граница Оленёкского криоартезианского бассейна (Басков, Климов, Кириухин, и др., 1974).
- Опорные разрезы:
Т-И-О - Турухано-Иркутско-Олёкминский;
А-С - Анабаро-Синский;
Ю-О - Юдомо-Оленёкский.

Широкое распространение соленосных отложений, имеющих значительную мощность, обусловило сохранность крепких и весьма крепких хлоридных рассолов с различным катионным составом и величиной минерализации. Соленосные карбонатные отложения нижнего кембрия содержат хлоридные кальциевые и хлоридные магниевые рассолы с минерализацией до 445 г/дм^3 . Водообильность соленосных пород в целом невысокая. Дебиты составляют $0.06\text{--}2 \text{ м}^3/\text{сут}$ при понижении до 1000 м. В редких случаях дебиты при самоизливе рассолов из скважин достигают $720 \text{ м}^3/\text{сут}$. В венд-нижнекембрийских терригенно-карбонатных породах подсолевого комплекса сосредоточены рассолы хлоридного кальциевого и хлоридного натриево-кальциевого состава с минерализацией до 434 г/дм^3 . Дебиты скважин, вскрывших осинский горизонт, не превышают $2 \text{ м}^3/\text{сут}$, ботубинский (при понижении 700-800 м) – $5\text{--}80 \text{ м}^3/\text{сут}$, вилучанский (при понижении 300-600 м) – $8\text{--}135 \text{ м}^3/\text{сут}$. Существенным отличием рассолов соленосных и подсолевых толщ является высокое содержание микрокомпонентов: брома – до 5, стронция – до 1.6, лития – до 0.03 г/дм^3 .

Юдомо-Оленёкский разрез на большей части Оленёкского бассейна отличается терригенно-карбонатным составом слагающих его нормально-морских отложений, вскрываемых в междуречьях рек Анабар, Оленёк, Муна и Тюнг. Верхняя часть разреза полностью проморожена на глубину до 186 м, а нулевая изотерма фиксируется на глубине 1194 м. Надмерзлотные подземные воды формируются лишь в сезонно-талом слое. В подмерзлотной части разреза вскрываются слабоводообильные водоносные комплексы.

Среднекембрийский водоносный комплекс вмещает криопэги с температурой от -3.5 до -6.7 °С. Открытая пористость коллекторов достигает 16%. Дебит скважин невысокий – 5-42 м³/сут, удельный дебит не превышает 2.9·10⁻³ л/с·м. В пределах кимберлитовых полей значения увеличиваются до 240 м³/сут и 0.3 л/с·м соответственно. Нормально-морские условия седиментации определили не только формирование слабопроницаемых глинисто-карбонатных толщ, но и соленых вод и рассолов с меньшей величиной минерализации и совершенно иным составом. Подземные воды представлены хлоридными кальциево-магниевыми натриевыми рассолами с минерализацией 76-135 г/дм³. В составе рассолов, вскрытых в кимберлитах, доминируют кальций и магний. Максимальное содержание брома – 1.05, стронция – 9.5, лития – 0.036 г/дм³.

В венд-нижнекембрийском комплексе, сложенном терригенно-карбонатными породами лагунного типа, вскрываются криопэги с температурой до -2 °С. Дебиты скважин не превышают 6.15 м³/сут, а удельные дебиты – 3.1·10⁻⁴ л/с·м. Наличие в породах прослоев гипса и ангидрита отражает условия седиментации, определившие формирование хлоридных натриево-магниевых кальциевых рассолов с минерализацией до 265 г/дм³. Максимальное содержание микрокомпонентов здесь значительно выше: брома – 2.5, стронция – 1.5, лития – 0.07 г/дм³.

Условия формирования среднекембрийских нормально-морских и венд-нижнекембрийских лагунных пород Юдомо-Оленёкского разреза обусловили их низкие параметры водообильности и значительно повлияли на состав солёных вод и рассолов, отличающийся относительно низкими значениями минерализации, а также содержанием макро- и микрокомпонентов.

Анабаро-Синский разрез характеризуется наличием погребенных рифогенных структур, вскрытых бурением в центральной и юго-западной частях Оленёкского бассейна. Отложения разреза в верхней части проморожены до 200-250 м, а мощность криолитозоны достигает 1450 м. Надмерзлотные воды вскрываются в слое сезонного оттаивания, а межмерзлотные образуют линзы и маломощные водоносные горизонты.

В подмерзлотной части разреза сформировалась серия водоносных комплексов, контрастно отличающихся своей водообильностью, составом и величиной минерализации соленых вод и рассолов и их температурой.

Первый подмерзлотный водоносный комплекс приурочен к перекрывающим рифогенные структуры глинисто-карбонатным породам верхнего кембрия. Температура криопэгов изменяется от -1.8 до -6.3 °С. Открытая пористость коллекторов достигает 2-15%. Максимальный дебит

скважин составляет 52 м³/сут, а удельный – 0.02 л/с·м. Водовмещающие глинисто-карбонатные породы образовались в условиях мелководного шельфа. Подземные воды комплекса представляют собой хлоридные натриево-магниевые-кальциевые и натриево-кальциево-магнелиевые солёные воды и рассолы с минерализацией 31-252 г/дм³.

Среднекембрийский водоносный комплекс вмещает криопэги с температурой от -1.7 до -3.5 °С. Баровые и рифогенные карбонаты отличаются коллекторами с высокой открытой пористостью (до 30 %). Благодаря высоким емкостным и фильтрационным параметрам коллекторов дебиты скважин варьируют в пределах 98-720 м³/сут, а удельный дебит достигает 17.8 л/с·м. В рифогенных карбонатах нижнекембрийского комплекса дебит скважин также высокий. При понижении до 17.5 м он составляет 58.8-480.4 м³/сут. Нижнекембрийские и верхнепротерозойские лагунные терригенно-карбонатные отложения менее водонасыщены. Дебит скважин при понижении до 600 м не превышает 21-33.4 м³/сут. Подземные воды всей нижней части разреза, включая рифогенные, баровые и лагунные отложения, представлены рассолами хлоридного кальциевого состава с минерализацией 223.6-404.3 г/дм³. Концентрация брома в них варьирует от 2.3 до 6.5 г/дм³. Максимальное содержание стронция составляет 2.1, лития – 0.6, рубидия – 0.1 г/дм³.

Благодаря рифогенным карбонатам Анабаро-Синский разрез отличается высокой водообильностью. Высокая минерализация и состав рассолов свидетельствуют об их внедрении из соленосных межрифовых толщ и активном взаимодействии с рифогенными карбонатными породами.

Третье положение: *Изотопный состав солёных вод и рассолов Оленёкского бассейна отражает их сложное взаимодействие с вмещающими породами на различных этапах осадочного процесса. Геохимические типы подземных вод Оленёкского бассейна (крепкие и весьма крепкие высоко метаморфизованные хлоридные кальциевые рассолы, разбавленные солёные воды и рассолы со смешанным катионным составом, хлоридные натриевые солёные воды и рассолы выщелачивания) существенно отличаются по содержанию изотопов ²H, ¹⁸O, ³⁷Cl, ⁸¹Br и отношению ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, что характеризует особенности их формирования.*

Изменения изотопного состава кислорода, дейтерия, хлора, брома и стронция в подземных водах бассейна определялись процессами фракционирования на различных этапах литогенеза и хорошо согласуются с известными в литературе экспериментальными данными (Валяшко и др., 1977; Holser, 1979; Eggenkamp et al., 1995; Yaqing, 2000 и др.).

Крепкие и весьма крепкие хлоридные кальциевые рассолы соленосных отложений и рифогенных карбонатов Оленёкского бассейна характеризуются отношениями $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$, равными 26-29, типичными для остаточных растворов, образованных в процессе испарительного концентрирования морских вод (рис. 2).

Солёные воды и рассолы, сформированные в верхней части разреза, имеют относительно низкие отношения $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ (7.7-12.3), что

свидетельствует о частичном разбавлении метеорными водами. Для подземных вод первых от поверхности подмерзлотных комплексов незначительное снижение $\delta^2\text{H}$ до -95.9‰ обусловлено влиянием криогенеза. Этот вывод экспериментально подтвержден на примере морских вод (Yaqing, 2000). Хлоридные натриевые рассолы выщелачивания по значениям $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ ($8.1\text{--}9.0$) близки к современным поверхностным водам бассейна.

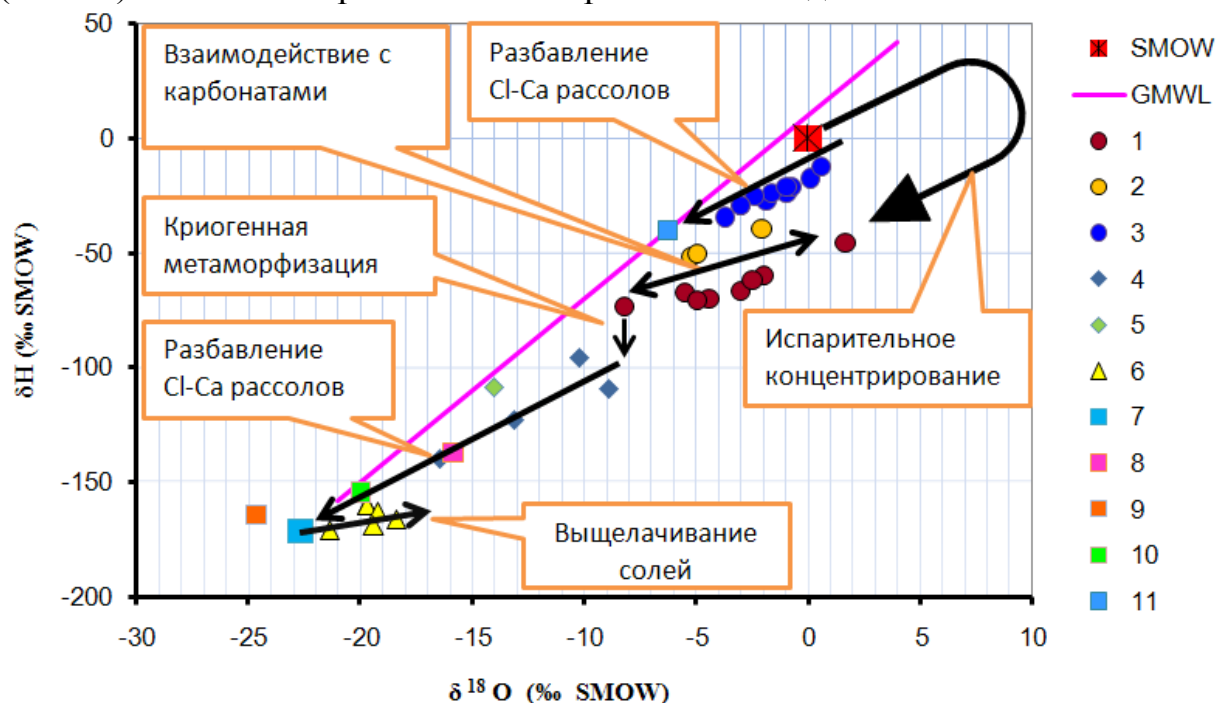


Рис. 2. Значения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в подземных водах Оленёкского бассейна

Обозначения на диаграмме: SMOW (Standart Midle Ocean Water) – стандарт среднеокеанической воды, GMWL (Global Meteoric Water Line) – или линия Крейга (Craig, 1961); точки: 1 – Cl–Ca весьма крепкие рассолы рифогенного комплекса в районе тр. Удачная (разрез Анабаро-Синского типа); 2 – Cl–Ca весьма крепкие рассолы межсолевого комплекса в районе тр. Мир (разрез Иркутско-Олёкминского типа); 3 – Cl–Ca слабые и крепкие рассолы соленосного силур-девонского бассейна Иллинойс (Stueber, Walter, 1991); 4 – Cl–Na–Ca–Mg и Na–Mg–Ca рассолы подмерзлотного комплекса (разрез Анабаро-Синского типа); 5 – Cl–Mg–Na рассолы центральной и юго-западной части Оленёкского бассейна (разрез Юдомо-Оленёкского типа); 6 – Cl–Na рассолы выщелачивания района тр. Мир* (разрез Иркутско-Олёкминского типа); 7 – метеорные воды Оленёкского бассейна (расчетные значения); 8 – воды р. Марха*; 9 – воды р. Ирелях*; 10 – воды р. Виллой*; 11 – метеорные воды бассейна Иллинойс (Clayton et al., 1966). Примечание: * – по данным ВСЕГИНГЕО.

Образование главного аниона рассолов – хлора связано с его накоплением в рапе солеродных бассейнов. Распределение значений $\delta^{37}\text{Cl}$ в рапе при эвапоритизации по экспериментальным данным происходит в пределах $+0.4 \div -0.9 \text{‰}$ (Eggenkamp et al., 1995). Метаморфизованные весьма крепкие хлоридные кальциевые рассолы Оленёкского бассейна, распространенные в подсолевых и межсолевых толщах, а также рифогенных карбонатах, имеют отрицательные значения $\delta^{37}\text{Cl}$ – от 0 до -0.7‰ . Эти значения характерны для рапы заключительных стадий испарительного концентрирования. Слабые и крепкие седиментогенные рассолы, залегающие

в надсолевых толщах и неглубоких горизонтах, потенциально открытых для водообмена, характеризуются весьма широким диапазоном значений $\delta^{37}\text{Cl}$ – от -0.4 до 0.6 ‰. Солёные воды и рассолы выщелачивания имеют значения $\delta^{37}\text{Cl}$ равные $-0.3 \div 0.3$ ‰, и входят в интервал $(-0.8 \div 0.9\text{‰})$, установленный для солей Туруханно-Иркутско-Олёкминского разреза (Eastoe et al., 2007). Это подтверждает представление об образовании хлоридных натриевых рассолов в результате инконгруэнтного растворения солей.

Большое отличие в группах рассолов выщелачивания и смешанных седиментогенных вод имеют пробы рассолов, вскрытых в районах распространения трапповых интрузий и кимберлитов, значение $\delta^{37}\text{Cl}$ в которых достигает 1.5-1.3 ‰. Известно, что высокие значения $\delta^{37}\text{Cl}$ (4.7‰) характерны для магматических флюидов, поровых вод грязевых вулканов, вулканических газов и включений в минералах магматических пород (Magenheim et al., 1995; Eggenkamp, Koster van Groos, 1997; Wei et al., 2007; Shaw et al., 2003; Banks et al., 2000). Таким образом, не исключено, что часть хлора, содержащегося в этих рассолах, поступила либо с магматогенными флюидами, либо в результате взаимодействия рассолов с магматическими породами, содержащими соединения хлора во включениях.

Не менее интересным является распределение изотопов брома в рассолах различного генетического типа. Для крепких рассолов характерны значения $\delta^{81}\text{Br}$, равные $-0.31 \div +0.7$ ‰. В рассолах выщелачивания они составляют $+0.20 \div +0.71$ ‰. В частично разбавленных седиментогенных солёных водах и рассолах со смешанным катионным составом отмечается более широкий диапазон значений $\delta^{81}\text{Br}$ $-0.8 \div +0.73$ ‰. Рассолы с высоким значением $\delta^{81}\text{Br}$ (3.35 и 2.31 ‰), также имеют наиболее высокие значения $\delta^{37}\text{Cl}$ (0.6 и 1.3‰). В целом отмечается прямая зависимость ($R^2 = 0.84$) между значениями $\delta^{81}\text{Br}$ и $\delta^{37}\text{Cl}$, что свидетельствует о совместном накоплении хлора и брома как в ходе испарительного концентрирования, так и при взаимодействии с содержащими эти элементы минералами и флюидами.

Изотопы стронция изучались в солёных водах и рассолах Далдынского кимберлитового поля, расположенного на юго-западе Оленекского бассейна. В ходе исследования были проведены определения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в подземных водах из обводнённых зон трещиноватости кимберлитов и водоносных горизонтов вмещающих пород, а также в породах различных литолого-фациальных толщ осадочного чехла.

Установлено, что в породах осадочного чехла значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ во многом зависят от их минерального состава. Так, в шельфовых терригенно-карбонатных отложениях мархинской свиты верхнего кембрия отмечаются самые высокие значения, составляющие 0.7131 и 0.7155. В баровых карбонатных отложениях чукукской свиты ниже-среднего кембрия отношение изотопов стронция составило 0.7106. Самые низкие значения характерны для рифогенных карбонатов удачининской свиты нижнего и среднего кембрия, они изменяются от 0.7087 до 0.7098. Повышение величины $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в терригенных породах обусловлено привносом

радиогенного ^{87}Sr из древних силикатов и их вторичных минеральных образований (Лепин, Борисов, 1979).

В соленых водах и рассолах верхнекембрийского комплекса мархинской свиты отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ составляет 0.7092. В крепких и весьма крепких рассолах среднекембрийского водоносного комплекса баровых отложений чукукской свиты значения немного ниже – 0.7089, а в рифогенных карбонатах удачининской свиты распространены весьма крепкие рассолы с самыми низкими значениями - 0.7086. Значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в рассолах зависят от состава вмещающих пород и величины их стронциевого отношения, что свидетельствует о высокой степени взаимодействия в системе «вода-порода» (рис. 3).

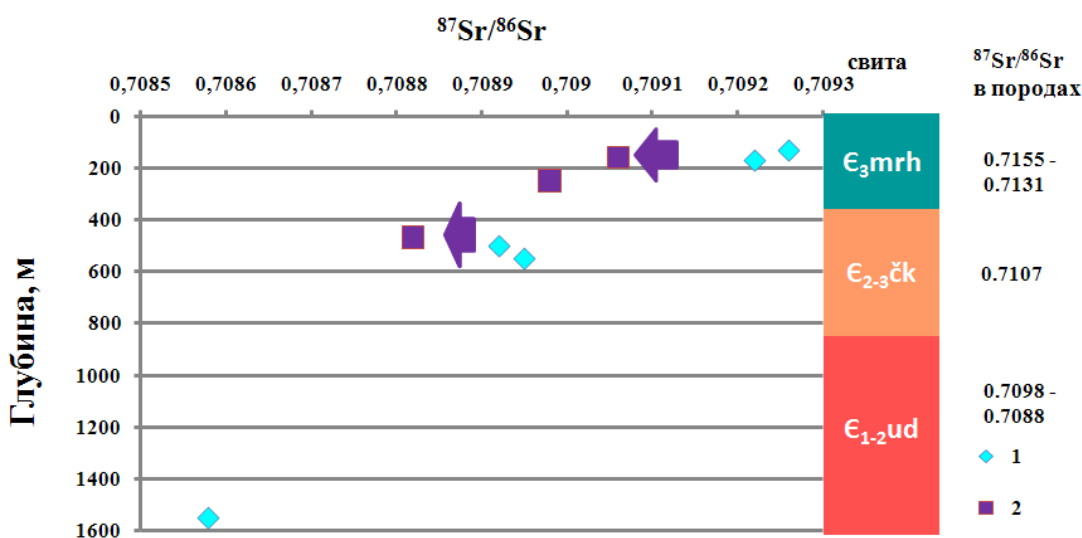


Рис. 3. Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в соленых водах и рассолах Далдынского кимберлитового поля в зависимости от состава пород.

1 – рассолы из водоносных горизонтов пород осадочного комплекса; 2 – рассолы зон трещиноватости в кимберлитах.

В рассолах зон трещиноватости кимберлитовых трубок Удачная и Зарница отмечаются более низкие значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, обусловленные взаимодействием рассолов с кимберлитами. Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в кимберлитах составляет 0.7059-0.7063 (Kamenetsky et al., 2004).

Величина $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в рассолах зависит от содержания стронция, при этом стронций находится в тесной корреляционной связи ($R^2=0.94$) с кальцием. Связь изменения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ с концентрацией стронция и кальция в рассолах указывает на процессы концентрирования этих элементов за счет взаимодействия рассолов с карбонатными минералами как вмещающих осадочных пород, так и кимберлитов.

Заключение

Результаты исследования позволяют сделать выводы, представляющие научную значимость.

1. Формирование солёных вод и рассолов Оленёкского криоартезианского бассейна было тесно связано с обстановками осадконакопления. На последующих этапах литогенеза в разнофациальных

зонах бассейна активно развивались процессы взаимодействия в системе «вода-порода-газ-органическое вещество», повлиявшие на образование определенных типов вод: крепких и весьма крепких метаморфизованных хлоридных кальциевых рассолов; разбавленных хлоридных солёных вод и рассолов смешанного катионного состава; хлоридных натриевых рассолов выщелачивания.

2. Длительная геологическая эволюция Оленёкского бассейна обусловила неоднородность фильтрационных параметров, водообильность вмещающих пород, специфику качества подземных вод и степень охлаждения недр. В результате в различных литолого-фациальных зонах бассейна сформировались три типа мерзлотно-гидрогеологического разреза – Туруханско-Иркутско-Олёкминский (соленосные отложения), Юдомо-Оленёкский (нормально-морские отложения), Анабаро-Синский (рифогенные отложения).

3. По изотопным данным глубоко залегающие крепкие и весьма крепкие хлоридные кальциевые рассолы близки к морской воде, сгущенной путем испарительного концентрирования. Это свидетельствует об их формировании в результате метаморфизации рапы кембрийских солеродных бассейнов. Солёные воды и рассолы верхней части разреза имеют признаки смешения седиментогенных вод с инфильтрогенными и магматогенными водами. Кроме того они в значительной степени подвергались влиянию процессов криогенеза. Хлоридные натриевые рассолы сформировались в результате выщелачивания соленосных отложений инфильтрационными водами. Близкие отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отражают высокую степень взаимодействия солёных вод и рассолов с вмещающими осадочными породами и кимберлитами.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

1. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., **Кононов А.М.** Факторы развития геокриологических процессов на северо-востоке Азии // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. – Иркутск: ИЗК СО РАН – ИрГТУ, 2004. – С. 95-102.

2. Алексеева Л.П., Chabaux F., Борисов В.Н., Алексеев С.В., Risacher F., Larke P., **Кононов А.М.** Новые данные об изотопии стронция в рассолах Далдыно-Алакитского района (Западная Якутия) // Фундаментальные проблемы современной гидрогеохимии: тр. междунар. конф., Томск, 4-8 октября 2004 г. – Томск: Изд-во НТЛ, 2004. – С. 36-40.

3. **Кононов А.М.** Особенности экологически безопасной изоляции дренажных рассолов карьера трубки Удачная // Гидроминеральные ресурсы Восточной Сибири: сб. научн. тр. конф., Иркутск, 2004. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. – С. 30-34.

4. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., **Кононов А.М.** Классификация и районирование геокриологических процессов на востоке России // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. – Иркутск: ИЗК СО РАН – ИрГТУ, 2005. – С. 129-135.

5. **Кононов А.М.** Мерзлотно-гидрогеологические условия Анабарского щита // Строение литосферы и геодинамика: матер. XXI Всерос. молодежн. конф., Иркутск, 19–24 апреля 2005 г. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2005 г. – С. 222-224.

6. **Кононов А.М.**, Алексеев С.В. Гидрогеологические особенности криолитозоны Далдынского и Верхне-Мунского кимберлитовых полей // Подземная гидросфера: матер. XVIII совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего востока. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. – С. 69-72.

7. **Кононов А.М.** Роль рифогенных образований в формировании рассолов Далдыно-Алакитского района // Тез. докл. Третьей Сибирской междунар. конф. молод. учен. по наукам о Земле. – Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 2006. – С. 120-121.

8. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Борисов В.Н., Шоукар-Сташ О., Фрейш Ш., Шабо Ф., **Кононов А.М.** Изотопный состав (H, O, Cl, Sr) подземных рассолов Сибирской платформы // **Геология и геофизика**. – 2007. – т. 48. – № 3. – С. 291-304.

9. **Кононов А.М.** Литолого-фациальные условия формирования подземных вод Оленёкского криоартезианского бассейна // Строение литосферы и геодинамика: матер. XXII Всерос. молодежн. конф., Иркутск, 24-29 апреля 2007 г. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007. – С. 192-193.

10. Алексеев С.В., **Кононов А.М.**, Алексеева Л.П. Криолитозона Анабарского щита // Криогенные ресурсы полярных регионов: матер. междунар. конф. – Салехард, 2007. – С. 81-83.

11. **Кононов А.М.**, Алексеев С.В., Сухов С.С., Алексеева Л.П. Особенности формирования криолитозоны юго-западного фланга Оленёкского криоартезианского бассейна // Гидрогеохимия осадочных бассейнов: тр. Рос. научн. конф. – Томск: Изд-во НТЛ, 2007. – С. 263-269.

12. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Шмаров Г.П., **Кононов А.М.** Техногенез криолитозоны Якутской алмазонасной провинции // Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения: матер. междунар. конф. – Тюмень, 2008. – С. 431-434.

13. **Кононов А.М.** Основные этапы формирования солёных вод и рассолов Оленёкского криоартезианского бассейна // Трофимуковские чтения – 2008, Т. 1: тр. Всерос. молодёжн. науч. конф., Новосибирск, 5-12 октября 2008. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2008. – С. 136-139.

14. **Кононов А.М.**, Алексеев С.В., Сухов С.С., Алексеева Л.П. Основные типы гидрогеологического разреза Оленёкского криоартезианского бассейна // Строение литосферы и геодинамика: матер. XXIII Всерос. молодежн. конф., Иркутск, 21-26 апреля 2009 г. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. – С. 234-235.

15. **Kononov A. M.**, Alexeev S.V., Sukhov S.S. The role of karst in the formation of saline waters and brines in the Oleniok Basin // Hypogene Speleogenesis and Karst Hydrogeology of Artesian Basins. – Simferopol: Ukrainian institute of Speleology and Karstology, 2009. – С. 287-292.

16. **Кононов А.М.** Солёные воды и рассолы Оленёкского криоартезианского бассейна // Подземные воды востока России: матер. XIX совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. – Тюмень: Тюменский дом печати, 2009. – С. 61-64.

17. Алексеев С. В., **Кононов А. М.**, Алексеева Л. П., Шмаров Г. П. Перспективы эффективной эксплуатации бессточных хвостохранилищ Удачинского ГОКа АК «АЛРОСА» // Горный журнал. – 2009. – № 6. – С. 53-56.

Подписано к печати 5 октября 2009 г.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная № 1. Гарнитура Таймс.

Печать Riso.

Усл. печ. л. 1.25. Тираж 100 экз. Заказ 615.

Отпечатано в типографии Института земной коры СО РАН.
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.