

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЗЕМНОЙ КОРЫ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



КОЗЫРЕВА ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА

**ЭКЗОГЕОДИНАМИКА КРУПНЫХ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
МОНГОЛО-СИБИРСКОГО РЕГИОНА**

25.00.08 –

инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

Диссертация на соискание
ученой степени доктора
геолого-минералогических наук

Научный консультант
доктор геолого-минералогических наук
С.В. Алексеев

Иркутск – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. Постановка проблемы, состояние изученности и методы исследований	13
Глава 2. Зона влияния ангарских водохранилищ	40
2.1. Климатические и инженерно-геологические условия	40
2.2. Экзогенные геологические процессы в зоне влияния водохранилищ....	53
2.3. Экзогеодинамика зоны влияния: этапы эволюционных преобразований экзогеодинамической обстановки.....	79
Глава 3. Береговая зона озера Байкал	93
3.1. Климатические и инженерно-геологические условия.....	94
3.2. Экзогенные геологические процессы, формирующие генетические типы и подтипы байкальских берегов	105
3.3. Экзогеодинамика береговой зоны: этапы техногенной трансформации байкальских берегов.....	131
Глава 4. Алмазоносное месторождение (на примере кимберлитовой трубки Нюрбинской)	148
4.1. Климатические и инженерно-геологические условия	148
4.2. Экзогенные геологические процессы на бортах карьера.....	161
4.3. Температурное состояние грунтов (результаты геокриологического мониторинга)	175
4.4. Экзогеодинамика территории месторождения, инженерно-геологическое районирование бортов карера	180
Глава 5. Городская территория (на примере Улан-Баторской агломерации)	202
5.1. Климатические и инженерно-геологические условия	202
5.2. Экзогенные геологические процессы в пределах городской агломерации	212

5.3. Анализ компонентов геологической среды, определяющих экзогеодинамическую обстановку, районирование территории.....	220
Глава 6. Экзогеодинамическая безопасность геологической среды.....	242
6.1. Типизация природно-технических систем региона.....	245
6.2. Принципы экзогеодинамической безопасности геологической среды	250
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	265
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	269

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. При повышении уровня социально-экономического развития общества закономерно возрастают требования к обеспечению рационального использования геологической среды и безопасного природопользования. Изучение современных экзогенных геологических процессов в связи с сохранением и охраной природных ресурсов стало приоритетным научным направлением в области инженерной геологии и экзогеодинамики. Этап покорения и освоения природных ресурсов, активного строительства сменился периодом длительной эксплуатации крупных природно-технических систем, требующим сохранения природного потенциала территорий, создания условий по предотвращению развития природных и природно-техногенных катастроф. Остро встают вопросы оценки экзогеодинамической обстановки крупных природно-технических систем, выявления современной динамики экзогенных геологических процессов, разработки разномасштабных и разновременных прогнозов дальнейшего развития созданных геосистем. Они формируют фундаментальную проблему и необходимость изучения экзогеодинамической обстановки природно-технических систем под влиянием деятельности человека.

Монголо-Сибирский регион занимает обширную территорию в центре Евразийского континента, включая юг Сибирской платформы, межгорные впадины, горные массивы Центрально-Азиатского складчатого пояса. В пределах региона созданы и эксплуатируются разные природно-технические системы, основные виды техногенной нагрузки которых связаны с использованием гидроэнергетического потенциала водных ресурсов, добычей полезных ископаемых, развитием крупных промышленных и городских агломераций.

Одним из значительных аспектов преобразования геологической среды в регионе стало строительство и длительная эксплуатация ряда крупных искусственных долинных водохранилищ. Эксплуатация созданных гидротехнических объектов перешла в бессрочный этап, планируется создание новых гидротехнических объектов. На современном этапе развития геологической среды назрела необходимость оценить масштабы трансформации компонентов геосистем в зонах влияния искусственных водоемов, установить современную динамику экзогенных геологических процессов и определить закономерности их развития, выявить группу опасных геологических процессов, развитие которых приводит к негативным последствиям.

Объект всемирного природного наследия ЮНЕСКО, древнее озеро Байкал с уникальной экзогеодинамической обстановкой на его берегах, расположен в Монголо-Сибирском регионе. Котловина горного озера включена в единую гидроэнергетическую

систему, служит резервуаром для накопления водной массы и уже более 60 лет имеет природно-техническое регулирование уровня воды в водоеме. Рассмотрение последствий поднятия уровня и его многолетнего регулирования, этапов трансформации элементов береговой зоны природного озера Байкал в условиях техногенеза, оценка текущего состояния береговых склонов, сопоставление данных и актуализация протяженности байкальских берегов имеют особое значение на современном этапе развития геологической среды и важны для понимания направленности эволюционного развития геосистемы и нацелены на обеспечение сохранности природного потенциала территории, геодинамической функции литосферы в целом.

Проблемы обеспечения безопасности и сохранения стабильных показателей производства при добыче полезных ископаемых являются наиболее острыми в научно-практических направлениях геологии. Сюда относится решение вопросов оценки текущего состояния природно-технической системы при эксплуатации месторождения, выявление компонентов геологической среды определяющих экзогеодинамику на участке работ, рассмотрение особенностей техногенной нагрузки на геологическую среду, организации мониторинга, разработка рекомендаций по предотвращению развития быстротекущих (катастрофических) экзогенных геологических процессов. В Монголо-Сибирском регионе активно осваиваются северные территории, где ведется промышленная разработка алмазоносных месторождений. Решение вопросов по обеспечению устойчивости конструктивных элементов горных выработок актуально для всех регионов мира. Особое внимание этим вопросам уделяется при ведении добычи открытыми горными выработками – глубокими карьерами в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов.

Рассмотрение особенностей и выявление закономерностей формирования экзогеодинамической обстановки современных городских территорий – важная проблема, решение которой влияет на формирование безопасной среды проживания населения. Важным аспектом данной проблемы является рассмотрение предрасположенности обжитых территорий к развитию определенных групп экзогенных геологических процессов, набора специфических процессообразующих факторов. В пределах существующих городских агломераций важны работы по идентификации геологической опасности, изучение и анализ морфологии рельефа, климато-гидрологических факторов, что в совокупности во многом предопределяет развитие быстротекущих, катастрофических экзогенных процессов.

В результате масштабных и разнонаправленных техногенных воздействий на геологическую среду, усилении роли человека в формировании современных

экзогеодинамических обстановок все более важным становятся вопросы контроля состояния созданных природно-технических систем с безопасным и прогнозируемым управлением динамикой экзогенных геологических процессов. Решение этих вопросов целесообразно выполнять согласно принципам экзогеодинамической безопасности геологической среды, которые применимы на всех этапах хозяйственного использования территорий: от проектирования сооружений до этапа бессрочной эксплуатации. Соблюдение экзогеодинамических принципов безопасности геологической среды в работах изыскателей и проектировщиков, эксплуатирующих организаций, с привлечением научного сопровождения разрабатываемых проектов позволят избежать возникновения катастрофических экзогенных геологических процессов, предупредить развитие чрезвычайных ситуаций и неблагоприятных последствий как для природной среды, так и для социально-экономической сферы деятельности человека.

Для оценки эволюционных преобразований экзогеодинамических обстановок в пределах Монголо-Сибирского региона выбраны **ключевые объекты** – природно-технические системы, наиболее полно отражающие типичные виды техногенных нагрузок. 1. Каскад крупных долинных водохранилищ многолетнего регулирования с амплитудой технического колебания уровня воды в водоеме до 10 м – ангарские водохранилища. 2. Уникальный естественный резервуар, объект всемирного наследия ЮНЕСКО – горное озеро Байкал, которое входит составной частью в единую гидроэнергетическую систему региона и имеет 60-летний период технического регулирования уровня воды. 3. Крупное кимберлитовое месторождение с открытым способом добычи алмазов, расположенное в области сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов – Накынское месторождение. 4. Самый крупный город в регионе, исторический центр, город миллионник – Улан-Батор. Выбранные объекты исследований представляют собой крупные и наиболее значимые природно-технические системы в регионе, которые расположены в разных структурно-геологических и природно-климатических условиях: от северных районов со сплошным распространением многолетнемерзлых грунтов, равнинной части Сибирской платформы с глубоким сезонным промерзанием до южных межгорных впадин и горно-складчатых районов со спорадическим присутствием многолетнемерзлых пород.

Цель работы

Выявление экзогеодинамических обстановок крупных природно-технических систем (ПТС) на территории Монголо-Сибирского региона, оценка современной динамики развития экзогенных геологических процессов, разработка принципов

обеспечения экзогеодинамической безопасности геологической среды региона в целях рационального природопользования.

Основные задачи

1. Оценить экзогеодинамическую обстановку зоны влияния крупных долинных водохранилищ, динамику экзогенных геологических процессов за период эксплуатации (на примере ангарских водохранилищ).

2. Определить этапы и особенности формирования экзогеодинамической обстановки береговой зоны озера Байкал в сложившихся природно-техногенных условиях.

3. Изучить природные и техногенные факторы, выявить закономерности формирования экзогеодинамических обстановок в ходе эксплуатации природно-технической системы месторождения, определить устойчивость конструктивных элементов бортов карьера (на примере Нюрбинского месторождения).

4. Выявить степень предрасположенности к формированию катастрофических экзогенных геологических процессов в пределах современной городской территории, идентифицировать природную экзогенную геологическую опасность (на примере Улан-Баторской агломерации).

5. Разработать принципы обеспечения экзогеодинамической безопасности геологической среды Монголо-Сибирского региона в условиях техногенеза.

Фактический материал и личный вклад

В диссертации изложены результаты многолетних научно-теоретических и прикладных исследований (1993–2019 гг.) состояния геологической среды Монголо-Сибирского региона, выполненных под руководством соискателя либо при его непосредственном участии в рамках государственных научно-исследовательских программ «Состояние геологической среды и подземной гидросферы Восточной Сибири в природных и техногенных условиях» 2007–2009 гг., «Природно-техногенные процессы в геологической среде и подземной гидросфере нефтегазоносных районов Восточной Сибири и сопредельных территорий 2010–2012 гг.», «Экзогенные геологические процессы Монголо-Сибирского региона: факторы развития, современная динамика и степень опасности» 2013–2016 гг., «Сейсмические и сейсмотектонические процессы и сейсмическая опасность Восточной Сибири: факторы, экзогеодинамика и прогноз» (с 2017 г. по наст. время); междисциплинарных научных проектов ИНЦ СО РАН («Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей», «Динамика опасных геосферных и биосферных природных процессов в Центральной Азии: сопоставление,

оценка, прогноз»), ежегодных экспедиционных проектов СО РАН и ИЗК СО РАН, международных проектов «Последствия поднятия уровня воды в реках, озерах и водохранилищах» (Польша, Силезский университет), «Тепловое состояние вечной мерзлоты», «Глобальный мониторинг состояния вечной мерзлоты (GTN-P)» (Соединенные Штаты Америки, Аляска).

Разработка фундаментальной научной проблемы осуществлялась при финансовой поддержке РФФИ – руководитель Российско-Монгольского проекта 2016–2018 гг. «Катастрофические процессы временных водотоков Улан-Баторской агломерации: факторы, оценка их динамики и прогноз», исполнитель проекта 2016–2018 гг. «Бугры пучения Окинского плоскогорья (Восточные Саяны): генезис и эволюция», организатор и руководитель международной конференции «Создание и использование искусственных земельных участков на берегах и акватории водных объектов» в 2013 г.

В результате исследований накоплен уникальный фактический материал по динамике экзогенных геологических процессов в регионе, зарегистрирована электронная база данных «Морфометрические параметры водосборных бассейнов Улан-Баторской агломерации», авторы Рыбченко А.А., Козырева Е.А., Мазаева О.А. (БД № 2017621004).

Методы исследований

Для решения поставленных задач применялись современные методы инженерной геологии, геокриологии, геоморфологии, геофизики, экологической геологии и других смежных научных направлений, экспериментального и теоретического уровня, привлекался обширный опубликованный, фондовый материал, касающийся территории Монголо-Сибирского региона, анализировались и обобщались данные разведочных работ ОАО АК «АЛРОСА» для Накынского кимберлитового поля.

В обработку включены фактические данные, полученные соискателем в результате организации и проведения многолетних режимных наблюдений на территории Восточной Сибири и Монголии (мониторинг береговой зоны Иркутского, Братского водохранилищ и озера Байкал, бортов карьеров Нюрбинский и Ботуобинский, эрозионных процессов Улан-Баторской агломерации). Специфика выбранных для исследований природно-технических объектов повлияла на выбор способов и методов изучения геологической среды. На крупных природно-техногенных объектах использован метод ключевых участков. При изучении береговых подводных склонов использовано эхолотирование. Выполнялась тахеометрическая съемка исследуемых участков. На закарстованных территориях Братского водохранилища выполнялась георадарная съемка. Применялся беспилотный летательный аппарат для выявления особенностей развития экзогенных процессов на труднодоступных территориях. Для изучения температурного поля грунтов использованы

термокосы, логгеры в автоматическом режиме записи данных. Опробование грунтов осуществлялось с использованием малогабаритной буровой установки. Петрографическое изучение горных пород, определение отдельных показателей физико-механических свойств грунтов выполнено в ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН, лаборатории инженерной геологии и геоэкологии, лаборатории магматизма древних платформ ИЗК СО РАН. Для обработки и анализа материала применены методы статистической обработки, системного анализа, типизации и классификации, использованы ГИС.

Достоверность научных результатов обеспечена выполнением работ в рамках государственных заданий, исследовательских проектов, финансируемых научными фондами, публикациями в рецензируемых рейтинговых журналах, а также государственной регистрацией электронной базы данных.

Научная новизна работы

1. Выполнена оценка современной экзогеодинамической обстановки зоны влияния ангарских водохранилищ, установлена динамика развития абразии, оползней, карста.

2. На основе обобщения опубликованных и фактических данных выделены четыре этапа трансформации береговой зоны озера Байкал, представлена сложившаяся экзогеодинамическая обстановка байкальских берегов в современных природно-техногенных условиях многолетнего регулирования уровня воды в водоеме.

3. Впервые детально изучены природные и техногенные факторы, определяющие направленность эволюции экзогеодинамических обстановок в ходе эксплуатации природно-технической системы месторождения, в результате чего установлено, что особенности природных геологических условий территории, находящиеся под динамическим воздействием техногенных факторов, определяют устойчивость конструктивных элементов борта карьера;

4. На основе детального анализа морфологических показателей территории впервые выявлена предрасположенность водосборных бассейнов к формированию катастрофических экзогенных геологических процессов, связанных с ливневыми осадками и выполнено инженерно-геологическое районирование территории города (на примере Улан-Батора).

5. Разработаны принципы обеспечения экзогеодинамической безопасности геологической среды Монголо-Сибирского региона.

Практическая значимость

Результаты исследования экзогеодинамических обстановок различных природно-технических систем Монголо-Сибирского региона позволяют решать конкретные

теоретические и практические задачи по предотвращению развития опасных и катастрофических экзогенных геологических процессов в ходе эксплуатации технических объектов, по обоснованию и организации мониторинга компонентов геологической среды, по оценке и построению прогнозов состояния геологической среды в условиях техногенеза. Результаты исследований могут быть адаптированы для анализа состояния геологической среды подобных природно-технических систем: водохранилищ долинного типа, естественных водоемов, месторождений полезных, ископаемых разрабатываемых открытыми горными выработками, городских территорий. Полученные результаты исследований используются научно-производственными предприятиями, научно-образовательными центрами, природоохранными структурами, государственными правовыми и административными органами региона.

Защищаемые положения

1. Современное экзогеодинамическое состояние зоны влияния долинных водохранилищ юга Восточной Сибири определяется в основном циклическим режимом сезонного и многолетнего регулирования уровня воды. Динамика абразионного, оползневого и карстового процессов за период эксплуатации отражается в абразионной активности разной степени, интенсивном проявлении сульфатного карста (на поверхности), локальном развитии оползней, а также сложном сочетании комплекса экзогенных геологических процессов.
2. Экзогеодинамическая обстановка береговой зоны озера Байкал за период технического регулирования уровня воды формировалась в четыре этапа. Современное развитие береговой зоны озера в природно-техногенных условиях определяется унаследованным профилем равновесия байкальских берегов, соотношением их генетических абразионно-аккумулятивных групп, пространственным переформированием аккумулятивных форм и увеличением протяженности техногенного (укрепленного) типа берега.
3. Современное состояние геологической среды территории разработки алмазоносных месторождений определяется сочетанием структурно-тектонических, геолого-литологических, мерзлотно-гидрогеологических условий и характером техногенеза. Устойчивость конструктивных элементов бортов карьеров определяется степенью реакции природных факторов на различные виды и масштабы техногенных воздействий.
4. Потенциальная подверженность водосборных бассейнов территории городской агломерации к формированию катастрофических экзогенных геологических процессов обусловлена морфометрией рельефа, геолого-литологическим строением и особенностями климата. В пределах крупных городских агломераций существуют

районы разной степени (низкой, средней, высокой) предрасположенности к формированию катастрофических экзогенных геологических процессов, связанных с ливневыми осадками.

5. Разработанные принципы экзогеодинамической безопасности геологической среды Монголо-Сибирского региона включают следующие процедуры: идентификацию геологической опасности, мониторинг и анализ эволюции геологической среды с обязательным привлечением научного сопровождения разрабатываемых проектов, которые направлены на сохранение природного потенциала экологических функций литосферы.

Апробация. Результаты авторских исследований и основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных форумах, конгрессах, совещаниях, конференциях: International Geological Congress, (Польша, 2005); IX, X Международная лимнологическая конференция (Польша, 2006, 2007); Международный симпозиум GLACKIPR «Карст и крио - карст» (Польша, 2007); Международная конференция Геологического общества Греции «Геологическая среда: прошлое, настоящее, будущее» (Греция, 2008); IX, X Российско-Монгольская конференция по астрономии и геофизике (Монголия, Россия, 2009, 2010); ежегодная Всероссийская научно-техническая конференция «Геонауки», г. Иркутск; III Всероссийская научная конференция с международным участием «Экологический риск и экологическая безопасность» (Иркутск, 2012), International limnological conference (Poland, 2012), Международная конференция «Создание и использование искусственных земельных участков на берегах и акватории водных объектов» (Барнаул, 2011; Иркутск, 2013), Российская археолого-этнографическая конференция студентов и молодых ученых (Иркутск, 2015), Всероссийская молодежная конференция "Строение литосферы и геодинамика" (Иркутск, 2015), 4-я Международная конференция «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита» (Иркутск-Аршан, 2016); III Всероссийское совещание и II Всероссийская молодежная школа по современной геодинамике «Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе» (Иркутск, 2016), The International conference on astronomy and geophysics in Mongolia (Ulaanbaatar, 2017); Международная научно-практическая конференция «Инновации в геологии, геофизике и географии (Крым, 2017); Международная конференция «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита» (Тбилиси, Грузия, 2018).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 170 работ, из них разделы в 12 монографиях и 45 статей в рецензируемых зарубежных и российских журналах из перечня

ВАК. Работы написаны в соавторстве со специалистами, которые не имеют возражений против защиты данной работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения (290 стр. текста, 116 рисунков, 9 таблиц, список используемой литературы включает более 300 источников).

Автор выражает благодарность научному консультанту – доктору геолого-минералогических наук С.В. Алексееву за внимание к работе, ценные советы и конструктивные замечания. За постоянную поддержку автор признателен коллективу Института земной коры СО РАН, всем сотрудникам лаборатории инженерной геологии и геоэкологии, специалистам и ученым, общение с которыми на разных этапах выполнения исследовательской работы способствовало формированию изложенных в работе идей и представлений: Т.Г. Рященко, Ю.К. Васильчуку, С. Демберелу, Д.А. Кошкареву, А.С. Гладкову, В.В. Акуловой, Д.О. Сергееву, А.Н. Хименкову, Л.А. Строковой, Л.П. Алексеевой, С.С. Черноморцу, А.М. Лехатинову, Л.И. Аузиной. За всестороннюю поддержку и терпение огромное спасибо моей семье и близким. Автор навсегда сохранит светлую память о наставниках и выдающихся ученых, оказавших влияние на выбор профессионального пути и формирование научных интересов: В.М. Степанове, Ю.Б. Тржцинском, К.Г. Леви, А.Ш. Хабидове, В.М. Литвине, Ф.Н. Лещикове, А.Л. Рагозине.

Глава 1. Постановка проблемы, состояние изученности и методы исследований

Развитие природной среды – естественный, неизбежный и постоянно действующий процесс. Изменения компонентов геологической среды происходят как в результате взаимодействия природных сил, так и под влиянием техногенных факторов, инициированных человеком, формируя при этом экзогеодинамические обстановки более сложные, чем при естественном течении событий. Последствия преобразования верхних горизонтов земной коры, современная динамика экзогенных геологических процессов стали важными задачами при решении глобальной проблемы обеспечения экологической безопасности и сохранения природного потенциала литосферы. Неизбежные эволюционные преобразования геологической среды в современных условиях стремительного развития общества неотделимы от социально-экономического роста национальной экономики и технического прогресса, как результата жизни и научных достижений человека. Научно-технические достижения человечества и их практические применения формируют современную и стремительно нарастающую техногенную нагрузку на геологическую среду. На выявление закономерностей эволюционных преобразований геологической среды нацелены исследования разных направлений науки во всем мире. Геологическая среда стала рассматриваться не просто как сфера жизнедеятельности человека, а как организованная среда обитания, связанная с разумной и гармоничной деятельностью человека, понимающего законы развития природных процессов и управляющего природной средой и созданной техногенной сферой. Необходимость познания этапов эволюционных преобразований геологической среды с формированием сложных экзогеодинамических обстановок связана с постоянным развитием природных и природно-техногенных процессов, протяженным периодом эксплуатации сети созданных технических объектов. В основу исследований геологической среды положен системный подход к изучению природно-технических систем [Бондарик, 1981,], а также всесторонний анализ развития региональных экзогенных геологических процессов в пространстве и во времени.

Понятие «геологическая среда» как предмет исследований был введен Е.М. Сергеевым и включает в себя «любые горные породы и почвы, слагающие верхнюю часть литосферы, которые рассматриваются как многокомпонентные системы, находящиеся под воздействием инженерно-хозяйственной деятельности человека, что приводит к изменению природных геологических процессов и возникновению новых антропогенных/ техногенных/ инженерно-геологических процессов, изменяющих инженерно-геологические условия определенной территории» [Сергеев, 1982]. Это

определение имеет очень важное теоретическое значение, и при таком рассмотрении геологическая среда анализируется с позиции системного подхода, представляет собой стройную систему связанных между собой и влияющих друг на друга компонентов. Термин «геосистема» впервые был предложен советским ученым В.Б. Сочавой в 1963 г. и стал применяться при системных исследованиях верхней части литосферы [Сочава, 1974]. В 1981 г. Г.К. Бондарик сформулировал теоретические основы элементов геосистем в инженерной геологии: «Системы, элементы которых полностью или в основном представлены твердыми, жидкими или газообразными компонентами геологической среды, называются геологическими системами (геосистемами). Геологические системы разделяются на природные и природно-технические. Геосистемы, в состав элементов которых входят искусственные объекты (искусственные среды) или существенно измененные человеком естественные объекты, – природно-технические системы (ПТС)» [Бондарик, 1981, стр. 19-20]. Смена экзогеодинамических обстановок природных или природно-технических систем с позиции инженерной геологии оценивается через преобразование компонентов геологической среды. Геологическая среда характеризуется некоторым набором показателей, значения которых в данный момент времени отражают ее состояние. Согласно Г.К. Бондарнику, природно-технические системы начинают формироваться с началом строительной или иной хозяйственной деятельности и движение (развитие геологической системы) продолжается в период эксплуатации, происходит трансформация, смена состояний.

За последнее время существенно изменились представления о роли человека в развитии природной среды и его вкладе в преобразование верхней части литосферы, формировании современных экзогеодинамических обстановок в частности. Четвертичный период, длившийся 2,6 миллиона лет, с того времени, когда зародилась жизнь человека на Земле, по мнению специалистов, окончен. Началась эпоха антропоцена – промышленного преобразования среды обитания людей. На Международном геологическом съезде в Кейптауне 50-е годы XX века признаны началом «антропоцена» на Земле [Waters, 2016]. Эволюционное развитие природной среды, в частности геологической, предполагает процесс трансформации, переход из одного состояния в другое с последовательной сменой событий, происходящих по законам природы. В последнее столетие бурной индустриализации и научно-технического прогресса Человечество все больше проникает в геологическое пространство, а геологическая среда развивается в условиях значительных техногенных нагрузок. В биосфере в результате ее эволюционного преобразования возникла техносфера (синонимы: ноогеосфера, антропосфера, ноотехногеосфера) [Котлов, 1978]. Техносфера – искусственная сфера техногенеза,

создаваемая в результате инженерной и хозяйственной деятельности человека в виде строительных и горных работ, зданий и сооружений различного назначения [Иванов, Тржцинский, 2001].

Вопросы взаимодействия инженерных сооружений с верхними горизонтами земной коры (литосферы), динамика развития геологических процессов в результате инженерно-хозяйственной деятельности человека, формирование современных экзогеодинамических обстановок традиционно рассматриваются инженерной геологией. Активное развитие направления инженерной геологии в начале прошлого века было продиктовано необходимостью проведения масштабных строек в Советском Союзе, возведением городов и масштабным гидроэнергетическим строительством, реализацией беспрецедентных проектов освоения территории европейской части России, Сибири и Дальнего Востока. Корифеями, стоявшими у истоков создания науки инженерной геологии, являются выдающиеся ученые Ф.П. Саваренский (1881–1946), Г.Н. Каменский (1892–1959), И.В. Попов (1902–1978), В.А. Приклонский (1899–1959), Н.Н. Маслов (1898–1986), Е.М. Сергеев (1914–1997), В.Д. Ломтадзе (1912–1993), Г.С. Золотарев (1914–2006), Ф.В. Котлов (1905–1991) и др. К настоящему времени масштабы техногенных воздействий и преобразований верхней части литосферы сопоставимы с самыми мощными природными силами, в геологическом прошлом не было таких прецедентов. В условиях техногенеза смена экзогеодинамических обстановок происходит стремительно быстро, в короткий с геологических позиций промежутков времени. После пионерного освоения и первого периода эксплуатации крупных технических объектов возникает необходимость изучения особенностей взаимодействия современной техносферы с геологической средой, учета ресурсной и геодинамической функций литосферы (по [Трофимов, Зилинг, 2002]), развивается научное направление «экологическая геология». Под зоной влияния технического объекта на геологическую среду, «сферой взаимодействия» (термин Г.К. Бондарика), «контасоной» (термин Г.А. Голодковской), «пространственным контуром литотехнической системы» (термин В.Т. Трофимова), исходя из понимания формулировок разных авторов, следует понимать некий объем горных пород, в пределах которого под влиянием природно-техногенных факторов происходят изменения всех или отдельных компонентов вмещающей геологической среды [Бондарик, 1981, 1986; Голодковская, Елисеев, 1989; Осипов и др., 1999; Трофимов, Зилинг, 2002; Тржцинский и др., 2005; Экзарьян, 2014], формируются новые экзогеодинамические обстановки. Экзогеодинамическая обстановка определяется интенсивностью и активностью современных экзогенных геологических процессов, масштабами и механизмами их проявлений, отражающих развитие геологической

системы в геологическом масштабе времени (эволюционные преобразования), определяющих предрасположенность территории к развитию тех или иных экзогенных геологических процессов в современных условиях, а также формирующих направленность развития системы и динамику процессов в будущем [Литвин, 1985;1989; Литвин, Тржцинский, 1993; Иванов, Тржцинский, 2001].

Природно-технические системы характеризуются открытостью, динамичностью и нестационарным режимом функционирования. Геологическая среда испытывает техногенные нагрузки и стремится к адаптации при новых условиях через перестройку структурных связей между компонентами (подсистемами, элементами) внутри системы, приводя к смене экзогеодинамических обстановок. Перестройка компонентов, трансформация связей, внедрение новых элементов в систему и воздействие дополнительных факторов приводят к запуску механизма смены состояний – развитию геологических процессов. Геологические процессы – это последовательная смена состояний геосреды, характеризующих ее структуру и свойства в определенный момент времени [Иванов, Тржцинский, 2001]. В пределах природно-технических систем может иметь место проявление новых, не свойственных ранее для данной территории экзогенных геологических процессов и /или активизация унаследованных геологических процессов с увеличением скорости развития и пространственных площадей проявления процессов. В природно-технической системе осуществляются взаимодействия между естественными ее элементами (горными породами, подземными водами, газами) и искусственными сооружениями, результатом которых является изменение состояний ПТС, формирование новой экзогеодинамической обстановки. Системообразующие свойства ПТС проявляются в инженерно-геологических процессах [Бондарик, 1981]. Геологические процессы, возникшие в результате деятельности человека, в различных областях исследований имеют разные термины: техногенно-геологические, антропогенные, природно-антропогенные, инженерно-геологические [Котлов, 1978; Горшков, 1979; Иванов, Тржцинский, 2001; Королев, Галкин, 2011].

При оценке экзогеодинамической обстановки той или иной территории, созданных и эксплуатируемых природно-технических систем важным является рассмотрение этапов преобразования геологической среды с момента освоения территории, строительства и учета периода эксплуатации технического объекта. Временной интервал, охватывающий период интенсивного преобразования геологической среды вследствие инженерной и хозяйственной деятельности человека, строительства технических объектов и эксплуатации природно-технических систем, называется периодом техногенеза. Динамические взаимодействия систем происходят с внешними средами – атмосферой,

гидросферой, биосферой; функциональные преобразования вызваны взаимодействиями между компонентами внутри геологической системы. При анализе состояния природно-технической системы, механизма ее трансформации в пространстве и во времени в геологической среде проявляются последствия динамических и функциональных взаимодействий. Развитие экзогенных геологических процессов (ЭГП), экзогеодинамическая обстановка рассматривается как результат сочетания всех компонентов и факторов: внутренних и внешних. Состояние ПТС в некоторый момент времени можно определить как набор показателей состояния, присущих геологической системе в этот момент времени и определяющих ее функционирование на текущий момент [Бондарик, 1981]. Геологические процессы, протекающие в недрах Земли и в приповерхностной части литосферы, можно рассматривать как проявление специфической геологической формы движения [Инженерная геология России, 2013]. Вследствие эволюционных преобразований геологической среды развиваются группы природных и природно-техногенных геологических процессов, формирующие определенные экзогеодинамические обстановки. Процесс непрерывного количественного изменения параметров компонентов природно-технической системы при взаимодействии природных и техногенных факторов отражается в смене экзогеодинамических состояний территории и демонстрирует направленность эволюции геологической среды в целом. Выявление закономерностей формирования экзогеодинамических обстановок и направленности эволюции геологической среды за период техногенеза является важной научной проблемой.

Геодинамическая функция литосферы выражается в изменении состояния литосферы и проявляется в виде развития геологических процессов в определенный момент времени. Геодинамическая экологическая функция литосферы, влияет на состояние биоты, безопасность и комфортность проживания человека. По классификации В.Т. Трофимова и Д.Г. Зилинга, учитывающей прямое воздействие экзогенных процессов на человека и экосистему в целом, на комфортность проживания человека через деформацию или разрушение инженерных сооружений, процессы делятся на группы – катастрофические, опасные и неблагоприятные. Изучение особенностей развития экзогенных геологических процессов и форм их проявлений является важным и актуальным направлением исследований в инженерной геологии. Развитие катастрофических процесс и формы их проявлений встречаются во многих регионах мира и становится предметом исследований научного сообщества. Катастрофический процесс – это внезапное событие, быстротекущий процесс, влекущий тяжелые последствия, разрушения и жертвы. Проявления катастрофических процессов естественны и

неизбежны, как компонент эволюции геологической среды Земли [Трофимов, Зилинг, 2002]. Быстродействующим геологическим процессам, исследованию предпосылок их развития, предупреждению и прогнозу уделяется огромное внимание, поскольку проявление катастрофических процессов приносит значительные разрушения, ущербы и представляет угрозу для жизни людей [Huijie Xiao, 2013; Осипов, 2013]. Проявления большинства катастрофических процессов связаны с природными факторами, как функциональными взаимодействиями компонентов внутри системы, так и динамическими воздействиями на систему. В результате реализации катастрофического процесса происходит резкое изменение структуры системы, приводящее к разрушению какой-либо ее области в результате внешних воздействий или перераспределения (разрядки) внутренних напряжений. Катастрофические процессы характеризуются неопределенностью момента, интенсивностью проявления и угрозой жизни человека в масштабах локального уровня. Для обжитых территорий, освоение которых сложилось исторически, проявление катастрофических процессов носит угрожающий характер. Городские территории при проявлении катастрофических процессов подвержены максимальному социальному и экономическому ущербу, что связано с высокой плотностью населения и наличием хозяйственно-промышленных объектов. Катастрофические геологические процессы, вызванные внешними климатическими факторами, привлекают пристальное внимание специалистов в связи с возможной масштабностью проявления и чрезвычайными последствиями. Особенно уязвимыми для воздействия климатических факторов становятся территории, расположенные в предгорных районах, чему способствуют геологические и геоморфологические условия – наличие энергии рельефа и литологических особенностей [Horton, 1945; Bovis, Jakob, 1999; Norikazu Matsuoka, 2010].

Опасные процессы приводят к изменению (трансформации) системы, опосредованно воздействуя на абиотическую составляющую, характеризуются потерей качества самого ресурса геологического пространства на региональном уровне [Трофимов, Зилинг, 2002]. Выявление региональных опасных экзогенных геологических процессов – не менее сложный и актуальный вопрос, поскольку их динамика может не угрожать жизни людей, но иметь стабильно высокий показатель на протяжении значительного времени, что ухудшает/снижает ресурсный потенциал природной среды. «Опасный техногенно-природный процесс – любые изменения состояния породных, водных, воздушных биотических или смешанных образований природы, обусловленные человеческой деятельностью, которые могут привести к негативным для человека, объектов хозяйства или окружающей среды (живой природы) последствиям [Природные

опасности России, 2003, стр. 285]. Показатели динамики развития современных экзогенных геологических процессов служат одним из критериев оценки состояния природно-технической системы и демонстрируют группу регионально опасных экзогенных геологических процессов. Экзогеодинамическая обстановка природно-технической системы, с определенным набором современных экзогенных геологических процессов отражает эволюционные преобразования геологической среды и демонстрирует реакцию на любые трансформации компонентов системы, изменения внешних и внутренних компонентов, через изменение активности, интенсивности и пространственные проявления (пораженность, плотность, локализация и др.) экзогенных геологических процессов. Высокие значения показателей динамики развития экзогенных процессов, превышающие унаследованные показатели предыдущего периода, активизация или внезапное проявление экзогенного геологического явления указывают на изменяющееся состояние системы. Показатели динамики развития экзогенных геологических процессов являются основой для построения пространственно-временных прогнозов.

Проблема эволюционных преобразований геологической среды, смены экзогеодинамических обстановок во времени актуальна для всех территорий земного шара, но для областей распространения многолетнемерзлых грунтов на современном этапе развития она требует более пристального внимания специалистов. Обсуждение аспектов эволюционного преобразования криолитозоны в четвертичный период широко обсуждается научным сообществом [Розенбаум, Шполянская, 1998; Nelson, 2002; Алексеев, 2007; Hugelius, 2013; Grosse, 2011; и многие другие]. Многолетнемерзлые грунты чувствительны к изменению внешних факторов и перестройке компонентов системы – глобальному потеплению климата и хозяйственной деятельности человека. Хрупкая природная обстановка районов криолитозоны, где в настоящее время сконцентрирована основная часть сырьевых запасов и возрастающий потенциал горнодобывающих производств, приводит зачастую к необратимым отрицательным экологическим последствиям при освоении северных регионов [Дроздов, 2011]. Современное температурное состояние многолетнемерзлых грунтов, сложившиеся инженерно-геологические условия территории во многом определяют устойчивость природно-технических систем и безопасность эксплуатации технических объектов в криолитозоне. Смена экзогеодинамических обстановок за период эксплуатации природно-технических систем в области распространения многолетнемерзлых пород является важным предметом исследований, с детальным рассмотрением компонентов геологической среды и сменой их состояний.

В эпоху экологизации мировоззрения решается всеобъемлющая проблема сохранения природных ресурсов планеты Земля в целом и на отдельных ее территориях в частности. Сохранение экологических функций литосферы нацелено на покрытие потребностей в ресурсах и жизнеобеспечении людей будущего. В научных публикациях широко освещены вопросы эволюции осадконакопления в истории Земли, с выделением нескольких этапов литогенеза, эволюционных преобразований климата и морфологии рельефа, геокриологических особенностей территорий с рассмотрением природного хода событий от древних геологических эпох до современности. Детального анализа периода техногенеза, наиболее мощного фактора современности в преобразовании геологического пространства Земли, формировании новых экзогеодинамических обстановок в пределах регионов в настоящее время недостаточно. Исследования экзогеодинамики периода техногенеза в пределах созданных и эксплуатируемых природно-технических систем не получили широкого распространения. Назрела необходимость в проведении обобщающих инженерно-геологических работ, детально рассматривающих смену экзогеодинамических обстановок за период техногенеза в пределах крупного региона.

Для выявления последствий преобразований геологической среды за период техногенеза, особенностей формирования экзогеодинамических обстановок крупных природно-технических систем выбран Монголо-Сибирский регион. На этой территории созданы и много десятков лет эксплуатируются крупные и уникальные природно-технические системы. Территория Монголо-Сибирского региона занимает значительную часть Евразийского континента; прошла длительную эпоху геологического развития; почти одновременно исторически осваивались; в эпоху индустриализации данные земли подверглись близким техногенным нагрузкам, связанным с добычей полезных ископаемых, гидроэнергетическим строительством и активным использованием природного потенциала территории.

Упоминание Монголо-Сибирского региона как территориальной единицы в общем контексте или в геополитике встречается довольно часто, особенно когда говорят о территории, где проходит граница России и Монголии. Монголо-Сибирский регион для России всегда имел и имеет важное стратегическое значение. С одной стороны, на данной территории сосредоточены уникальные природные богатства, с другой – выгодное местоположение в центре континента позволяет выстраивать добрососедские, экономические отношения России со странами-соседями. Эти аспекты и обеспечили особенность хозяйственного освоения в историческом прошлом и продолжают формировать стратегию современного промышленно-политического развития территории,

определяя тем самым основные социально-экономические отличия Монголо-Сибирского региона от других регионов.

Заселение и хозяйственное освоение территории Монголо-Сибирского региона в историческом времени были продиктованы политическими и экономическими потребностями страны (Российской империи). До 1572 года территория Восточной Сибири являлась частью Сибирского ханства, которое населяли кочевые народы. С 1615 года началось продвижение казаков в южно-сибирские земли. Реки служили основными транспортными артериями, в 1629 году енисейский воевода Яков Хрипунов двинулся на 20 судах на Илим, Оку и вверх по Ангаре в поисках серебра. В 1648 году Иван Похабов переправился через Байкал, высадился в районе современного Танхоя и покори тунгусского князя Турукая [Леви, Задонина, 2006]. 1660 год считается годом окончательного вхождения этого региона в Московское государство. Тогда на левом берегу Ангары в 80 км ниже Иркутска возникло село Тельма в связи со строительством войлочного завода (промышленный человек Иван Похабов), а в 1673 году была построена государственная мельница на реке Кая в Иркутске – первое промышленное сооружение в Прибайкалье. В это время активно составлялись карты сибирских земель, были открыты залежи медной руды, железа, серебра и др. [Задонина, Леви, 2008].

В историческом времени в первую очередь осваивались более доступные и удобные для освоения территории. Фактически техногенными преобразованиями были затронуты локальные участки. Если учитывать общий исторический этап освоения региона, с момента приобретения им промышленной (того времени), экономической и политической самостоятельности – с 1660 года и до настоящего времени, то период техногенных преобразований геологической среды в регионе составляет около 360 лет. За это время техногенная нагрузка увеличилась многократно. Возросли масштабы и площади преобразованных территорий и их использование для разных социально-экономических целей. В то же время территория Монголо-Сибирского региона до настоящего времени заселена неравномерно, что сильно отличает ее от территорий европейской части России. Северные районы заселены слабее южных. На севере по статистическим данным проживает менее 1 человека на 1 км². Разница в плотности населения региона связана с последовательностью этапов хозяйственного освоения земель. С 50-х годов прошлого века была реализована стратегия индустриального освоения, возникли мощные энергопромышленные центры на базе гидроэнергии реки Ангары. Была освоена центральная и северная часть региона. К настоящему времени наиболее плотно заселены районы крупных промышленных центров, плотность населения которых достигает 25 чел./км² (Усольский район), 30 чел./км² (Ангарский) и 60 чел./км² (Иркутский), что

сопоставимо с наиболее освоенными промышленными регионами Европейской России [Винокуров, Суходолова, 1998].

Пространственно границы Монголо-Сибирского региона охватывают часть Сибирской платформы и примыкающую часть Центрально-Азиатского складчатого пояса. На севере территория региона ограничена Тунгусским плато по р. Виллой и на востоке поворачивает вдоль Центрально-Тунгусского плато на юг, захватывая часть Байкальской рифтовой зоны и Селенгино-Витимский синклиний до Центрально-Азиатского складчатого пояса, на юге включает Хангай-Хэнтейское поднятие, Восточный Саян, к западу простирается до Енисейского кряжа (рис. 1.1). Монголо-Сибирский регион включает в себя крупные морфоструктуры Сибирской платформы – разновыстные расчлененные плато, представляющие сложносопряженные системы моноклиналей, пологих антиклиз (Лено-Ангарское плато), синиклиз, образованных сочетанием неглубоких обширных котловин, гребневидных складок (Ангаро-Непское плато), антиклинальных структур, уплощенными грядами (Центрально-Тунгусское плато); и горно-складчатой Байкальской рифтовой зоны – глубоко расчлененный рельеф высоких гор и поднятий (Восточные Саяны) [Литвин, 1989], сочетание и чередование сводовых и сводово-глыбовых поднятий (Хангай-Хэнтейское поднятие), горст-антиклинальных структур и грабен-синклинальных впадин. Сложность структурно-тектонического строения, высотная контрастность рельефа, геолого-литологическая изменчивость состава и свойств горных пород предопределили природное многообразие экзогеодинамических обстановок на территории Монголо-Сибирского региона.



Рисунок 1.1. Схема положения границ Монголо-Сибирского региона.

Н.А. Флоренсов одним из первых в своих работах описал геологические особенности и территориальное положение Монголо-Сибирского региона. В его трудах сделаны основополагающие шаги в теории геоморфологии Внутренней Азии – Прибайкалья, Забайкалья и Монголии. С соавторами им рассмотрена территория Южной Сибири вместе с территорией Монголии и впервые показан Монголо-Сибирский регион как единый геолого-структурный объект, имеющий определенное структурно-тектоническое строение, обладающий геологическими особенностями, длительной историей формирования рельефа и определенными закономерностями развития опасных геологических процессов. Впервые была дана характеристика вклада эндогенной (морфоструктурной) и экзогенной (денудационной) составляющих в историю формирования и современный облик рельефа Монголо-Сибирского региона [Катастрофическое Гоби-Алтайское землетрясение. Сейсмогеологический очерк, 1963].

Термин Байкало-Монгольский, и/или чуть шире – Монголо-Сибирский/Байкальский регион, используется многими исследователями - геологами,

геоморфологами, географами при рассмотрении части территории Сибирской платформы (южные районы Якутии, Прибайкалье, Забайкалье, Хубсугул) и Байкальской рифтовой зоны как единого геологического региона. В работах географической направленности рассматривается территория Байкальского региона как административная единица, включающая Иркутскую область, Республику Бурятия, Забайкалье, часть Монголии, юго-восток Республики Тува в водосборном бассейне оз. Байкал [Абалаков, Базарова, 2017]. Монголо-Сибирский регион описан в сейсмологии при характеристике сейсмической неоднородности территории, поскольку он включает в себя территории высокой сейсмической активности – рифтовую зону и южную часть Сибирской платформы как область транзита сейсмических волн. В последние несколько лет вышли обобщающие монографии по вопросам сейсмичности и районирования сейсмической опасности отдельных районов Монголо-Сибирского региона [Сейсмичность и районирование ..., 2009], комплексного изучения активных разломов [Опасные геологические процессы..., 2017]; оценки лессовых грунтов Монголо-Сибирского региона [Рященко и др., 2014]. Понятие Монголо-Сибирского региона, его территориальное положение, геологические особенности встречаются в научных работах геологов разных направлений. При рассмотрении региона как базового полигона при специализированных исследованиях изучаются его составные части на разных уровнях детальности исследований – в пределах отдельных районов региона как составных его частей, в местах интенсивного развития и проявления опасных геологических процессов (уровень локальных участков), точно на ключевых участках по опробованию геолого-литологических разрезов (уровень детальных исследований). Исследовательские работы в разных научных направлениях геологии позволили получить информацию по сейсмичности, структурно-тектоническим особенностям, литологическому строению, показав его структурно-геологические особенности и литологическую уникальность, отличие от сопредельных территорий. Вопросы преобразований геологической среды за период техногенеза затрагивались косвенно и только для локальных участков. До сегодняшнего времени не выполнено обобщающих научно-исследовательских работ, отражающих трансформацию экзогеодинамических обстановок и дающих представление о современном состоянии крупных природно-технических систем, определяющих направленность развития геологической среды региона в целом.

В настоящее время в пределах Монголо-Сибирского региона расположены крупные промышленные центры, городские агломерации, проходят основные транспортные артерии, соединяющие центральную часть России с ее северными и восточными частями, сопредельными государствами. Крупные города и агломерации

региона отражают этапы исторического освоения, продолжая культурный, промышленный и экономический рост. Продолжают формироваться городские агломерации (Иркутская агломерация), в регионе расположен город-миллионник, в котором проживает 1 миллион 380 тыс. человек (г. Улан-Батор). Промышленно-хозяйственные центры, соединенные разветвленной сетью инфраструктуры, составляют промышленный каркас России и сопредельных территорий, являясь базисом экономического роста региона, развития международных отношений с соседями-партнерами. Монголо-Сибирский регион лидирует в России по запасам минерального сырья – нефти, газа, коренных и рассыпных алмазов, золота и др. Работы по добыче, транспортировке и первичной переработке в промышленных объемах проводят крупные российские и международные корпорации: ПАО «Транснефть», ОАО «АЛРОСА», ООО «Кнауф», Группа «Илим» и др. Регион обладает колоссальными водными ресурсами, что позволяет осуществлять промышленную выработку электроэнергии, ее переброску в соседние регионы, покрывая потребности крупных энергоемких производств Сибири. Подписан двухсторонний договор с Китаем об открытии в Иркутске крупного дата-центра по хранению, переработке и передаче информации с использованием вырабатываемой электроэнергии региона (<http://i38.ru/technologii-kommentarii/>). Помимо внушительных промышленных ресурсов, регион обладает высоким рекреационным потенциалом, здесь проходят многие туристические маршруты Сибири и Монголии. В силу неравномерности освоения и заселения территории здесь сохранились не тронутые цивилизацией уголки природы. В регионе расположено уникальное озеро Байкал – объект всемирного наследия ЮНЕСКО, древнее и одно из самых глубоких озер мира с сохранившимися на берегах геологическими памятниками природы. Российским государством определены границы особо охраняемых природных территорий Байкальской экономической зоны и особенности эксплуатации самого водоема, а также прилегающих к нему территорий.

Сложность и разнообразие геолого-геоморфологических, структурно-тектонических, литологических, сейсмических и геокриологических условий Монголо-Сибирского региона определены его территориальным положением в центре Евразийского континента, в переходной области от южного выступа Сибирской платформы к Байкальской рифтовой зоне. Созданные природно-технические системы в пределах Монголо-Сибирского региона имеют сложные инженерно-геологические условия, отличные друг от друга и от других геосистем европейской части России. Для дальнейшей безопасной и устойчивой эксплуатации природно-технических систем в регионе, выявления закономерностей формирования экзогеодинамических обстановок при определенных видах техногенной нагрузки необходимо расширение знаний о

современной динамике экзогенных геологических процессах, обобщение накопленной информации, выявление направленности этих изменений за период эксплуатации технических объектов и углубление знаний о функционировании природно-технических систем. На решение этих вопросов нацелено настоящее диссертационное исследование. Исследование экзогеодинамики крупных природно-технических систем Монголо-Сибирского региона актуально и вносят научный вклад в развитие направления региональной инженерной геодинамики. Значимость исследований связана с необходимостью получения новых данных по особенностям формирования экзогенных геологических процессов в различных природно-технических системах, с разными видами техногенной нагрузки на геологическую среду. Полученные в ходе работ результаты будут способствовать предотвращению развития чрезвычайных ситуаций при эксплуатации природных ресурсов, сохранению природного потенциала территории и разработке принципов экзогеодинамической безопасности геологической среды региона.

Таким образом, Монголо-Сибирский регион представляет собой крупный территориальный блок земной коры, включающий в себя локальные элементы – структурно-геологические морфоструктуры и комплекс созданных природно-технических систем (техносферу), обладающих определенным строением и особыми характеристиками. В данной работе Монголо-Сибирский регион рассматривается как базовый для исследования преобразований геологической среды, смены экзогеодинамических обстановок за период техногенеза и выявления современной динамики экзогенных геологических процессов. В качестве объектов исследований выбраны наиболее крупные природно-технические системы со значительным периодом эксплуатации, развивающиеся в особых экзогеодинамических обстановках региона и являющиеся аналогами при рассмотрении функционирования природно-технических систем во времени и пространстве с учетом определенного вида техногенной нагрузки.

Многие виды народно-хозяйственной деятельности в регионе связаны с эксплуатацией природных ресурсов и активным использованием геологической среды. Для Монголо-Сибирского региона проблема оценки современного состояния геологической среды в пределах существующих технических объектов актуальна еще и потому, что территории региона активно осваиваются, применяются современные методы и технологии, увеличиваются масштабы и степень техногенных воздействий, что формирует необходимость оценки последствий эксплуатации ПТС, их текущего состояния и направленность развития геологической среды в условиях техногенеза.

Монголо-Сибирский регион в геологическом отношении достаточно хорошо изучен. На разных этапах освоения территории Восточной Сибири и Монголии изучением

состояния геологических компонентов Сибирской платформы, Байкальского рифта и смежных территорий занимались крупные советские ученые. М.М. Одинцов показал взаимоотношение докембрийских структур краевой антеклизы Иркутского амфитеатра с Байкальской складчатой зоной Восточного Саяна [Геология и полезные ископаемые Восточной Сибири, 1985]. Исследования по стратиграфии кайнозойских отложений юга Восточной Сибири представлены в работе Н.А. Логачева [Логачев, 1964]; А.Б. Иметхенова [Иметхенов, 1987], В.Д. Маца [Мац, 1974; Мац и др., 1975] и др. Вопросы геоморфологического районирования Сибири были подробно освещены в работах С.С. Воскресенского, С.Ф. Козловской, Л.Д. Базаровой, И.Н. Резанова и др. Результаты работ по исследованию геологических условий и их особенностей отражены в публикациях В.П. Солоненко, Г.П. Вологодского, Г.А. Голодковской, Г.Б. Пальшина, О.В. Павлова, В.И. Астраханцева, Ю.Б. Тржцинского, В.М. Филиппова, Ф.Н. Лещикова, В.М. Литвина, А.А. Рогозина, А.М. Лехатинова, В.К. Лапердина, Л.А. Сироткина, А.В. Кадетовой, С.Б. Кузьмина, Б.И. Писарского, С.В. Алексева, Б.М. Шенькмана, Н.И. Демьянович, Т.Г. Рященко, Г.М. Пуляевского, Г.И. Овчинникова, В.В. Акуловой и многих других. Опубликованы базовые монографии: «Инженерная геология Прибайкалья», [1968]; «Оползни, сели, термокарст в Восточной Сибири и их инженерно-геологическое значение», [1969]; «Братское водохранилище», [1963]; «Усть-Илимское водохранилище», [1975]; «Богучанское водохранилище», [1979], «Геология и сейсмичность зоны БАМ, 1985» и др. Под редакцией Г.А. Голодковской составлена монография «Инженерная геология СССР» [1977] в восьми томах, в которой описаны инженерно-геологические условия районов и опыт промышленно-гражданского строительства, гидротехнических сооружений в регионе. Проблемы изменения подземной гидросферы отражены в работах Е.В. Пиннекера, Б.М. Шенькмана, Б.И. Писарского, Ю.И. Блохина, В.А. Малий, С.Х. Павлова, С.В. Алексева, Л.П. Алексеевой, Л.И. Аузиной, М.А. Тугариной и др.

На этапах строительства природно-технических систем региона для разных научных и народно-хозяйственных целей выполнялись работы по выявлению особенностей развития экзогенных геологических процессов (оползни, карст, сели, эрозия, абразия, выветривание и др.), осложняющих освоение территорий и эксплуатацию природно-технических систем. Особенности развития карста на территории Восточной Сибири освещены в работах Г.П. Вологодского, В.М. Филиппова, А.Г. Филиппова, В.М. Литвина. Особенности распространения и состоянию многолетнемерзлых грунтов на территории региона посвящены работы Ф.Н. Лещикова, М.М. Шаца, В.Р. Алексева, О.И. Баженовой, В.Г. Кондратьева, А.А. Сороковой, С.В. Алексева и других ученых.

Даны представления о площадях и границах распространения многолетнемерзлых пород, литологических разностях и их температурном поле, мощности сезонного промерзания и протаивания. На первых этапах эксплуатации ангарских водохранилищ Г.М. Пуляевским впервые для сибирских водохранилищ предложена методика расчета переработки береговых склонов. Метод расчета разработан им (в литературе упоминается как метод ИЗК СО РАН) на основе принципиальных подходов к оценке переработки склонов в условиях искусственных водоемов, предложенных Е.К. Гречищевым. На первых этапах эксплуатации водохранилищ Г.М. Пуляевским и Г.И. Овчинниковым выполнен прогноз развития абразионного процесса [Овчинников, 1999]. До настоящего времени анализ реализации прогнозов не выполнялся.

Расположение в регионе Байкальской рифтовой зоны способствует специфическому распределению тектонических структур и проявлению сейсмичности. Сейсмотектонические условия отличаются площадной неоднородностью и различной активностью. Особенности структурно-тектонического строения показаны в работах разных лет С.И. Голенецкого, Н.А. Флоренсова, Н.А. Логачева, А.А. Трескова, В.П. Солоненко, В.В. Николаева, Ю.А. Зорина, С.И. Шермана, К.Ж. Семинского, А.С. Гладкова, В.В. Ружича, С. Дэмберела и др. Проблемам сейсмической активности региона посвящены труды плеяды ученых: Н.А. Флоренсова, С.М. Замараева, Н.А. Логачева, Ю.А. Зорина, С.И. Голенецкого, С.И. Шермана, К.Г. Леви, А.В. Чипизубова, К.Ж. Семинского, В.И. Мельниковой, В.И. Джурика, А.В. Ключевского, С.П. Серебрянникова, В.М. Демьяновича, Т. Батсайхана, Г. Баяраа и других. Одним из аспектов исследования сейсмичности региона в последние десятилетия стали сейсмические события, регистрируемые в окрестностях водохранилищ Ангарского каскада ГЭС [Pavlenov, Sherman, 1996; Golenetskii, 1997, 1998, 2001; Seminskii, Radziminovich, 2007; Chipizubov, 2010; Tatevossian, Mokrushina, 2013; Seredkina, 2015].

Работ по оценке состояния геологической среды региона и развитию экзогенных геологических процессов на современном этапе немного. Следует выделить работы С.А. Макарова, Т.Г. Рященко, В.В. Акуловой «Геоэкологический анализ территорий распространения природно-техногенных процессов в неоген-четвертичных отложениях Прибайкалья», 2000; Ю.Б. Тржцинского, Е.А. Козыревой и др. «Современная экзогеодинамика юга Сибирского региона», 2007, и «Экзогенные процессы в геологической среде. Оценка природных опасностей», 2008; А.А. Рыбченко, А.В. Кадетовой «Методика оценки опасности ЭГП с использованием ГИС-программ», 2009; Т.Г. Рященко «Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь)», 2010; С.Б. Кузьмина «Опасные геоморфологические процессы и риск природопользования»,

2009; И.Н. Владимирова и др. «Районирование опасных геоморфологических процессов в центральной экологической зоне Байкальской природной территории», 2011; Ю.В. Рыжова «Формирование оврагов на юге Восточной Сибири», 2015. В работах разных лет Ю.Б. Тржцинского, В.М. Литвина, А.А. Горюнова, Т.Г. Рященко, В.К. Лапердина, А.А. Рогозина, Н.И. Демьянович, Б.И. Писарского, Б.М. Шенькмана, И.И. Верховина отражены основные аспекты преобразования компонентов геологической среды в результате воздействия разнонаправленных техногенных факторов. В результате долгого периода локальных и детальных исследований объектов, расположенных на территории региона, накоплен обширный фактический материал, включающий оценку инженерно-геологических условий на разных этапах освоения территории, характеристику экзогенных геологических процессов Восточной Сибири, а также отражающий развитие литогенетического направления в области грунтоведения. На территории Монголо-Сибирского региона изучены закономерности формирования и свойства кайнозойских отложений, в том числе лессовых грунтов, которые представлены в работах И.И. Молодых, Т.Г. Рященко, В.В. Акуловой, Н.Н. Уховой, С.И. Штельмах, Н.Н. Гринь. Выявлены особые тиксотропно-реологические свойства и геохимические особенности состава глинистых грунтов и результаты исследований представлены в публикациях В.В. Акуловой, Т.Г. Рященко, Н.Н. Уховой.

В то же время последовательного рассмотрения смены экзогеодинамических обстановок, выделения этапов трансформации геологической среды за период техногенеза на территории Монголо-Сибирского региона до настоящего времени не проводилось. Отсутствуют обобщающие инженерно-геологические работы, освещающих вопросы последствий эксплуатации крупных природно-технических систем в регионе и анализа динамики развития экзогенных геологических процессов.

Одной из важных задач современных исследований стала оценка состояния геологической среды крупных водных объектов региона после периода длительной эксплуатации в энергетических целях – каскада ангарских водохранилищ и озера Байкал. С момента ввода в эксплуатацию одного из самых крупных гидроэнергетических каскадов мира – Ангарских водохранилищ – прошло более полувека. Это громадное техническое сооружение, управляемое человеком несколько десятков лет, оказывает комплексное воздействие на геологическую среду и привело к трансформации многих ее компонентов, однако до настоящего времени не проанализированы последствия эволюционных преобразований геологической среды крупной природно-технической системы. На современном этапе эксплуатации водохранилищ все еще слабо изучены особенности динамики экзогенных геологических процессов за период эксплуатации искусственных

платформенных водоемов со значительной проектной амплитудой колебаний уровня воды (до 10 м) и естественных водоемов, используемых как дополнительный резервуар для накопления водной массы. Отсутствуют количественные данные по динамике абразионного, оползневого, карстового процессов, наиболее ярко проявляющихся в зоне влияния водохранилищ. Необходимо проанализировать темпы активности экзогенных процессов как в пространстве, так и во времени определить реакцию береговых склонов на эксплуатационные колебания уровня воды, степень опасности экзогенных геологических процессов на современном этапе эксплуатации природно-технической системы. Для Монголо-Сибирского региона рассмотрение последствий длительной эксплуатации искусственных долинных водохранилищ особо актуальны также в связи с обсуждением возможности регулирования стока реки Селенги при проектировании и возможном строительстве ГЭС на территории Орхон-Селенгинского бассейна в Монголии.

Проблема существования уникальных природных объектов в условиях техногенеза как компонентов геологической среды, отражающих природный потенциал территории, и их сохранения является острой для многих регионов мира, в том числе и для территории Монголо-Сибирского региона. Озеро Байкал – это визитная карточка страны, Байкальская природная территория – весомый политико-экономический ресурс для России в целом. Изучением береговой зоны оз. Байкал и прилегающих территорий в разные периоды занимались видные советские и российские ученые: И.Д. Черский, Н.П. Ладохин, В.В. Ламакин, Е.Г. Гречищев, Г.В. Чарушин, Г.С. Золотарев, Г.М. Пуляевский, А.Б. Иметхенова, А.В. Пинегин, А.А. Рогозин, А.А. Якимов и многие другие. В последние годы особое внимание к озеру Байкал было приковано в связи с созданием Байкальской экологической территории и ее зонированием. Проведены исследования компонентов природной среды географического направления, результаты отображены в работах: «Экологический атлас бассейна озера Байкал», 2015; «Атлас. Иркутская область: экологические условия развития», 2004, и др. При всей многочисленности исследований, посвященных изучению отдельных компонентов природной среды озера Байкал, остается недостаточно освещенной проблема технического использования природного резервуара в энергетических целях и формирования береговой зоны озера в условиях нового положения уровня и длительного технического регулирования уровня воды в водоеме. Работ, направленных на сопоставление состояния береговой зоны озера Байкал сразу после наполнения, в начальный период эксплуатации, и современного состояния, на сегодняшний день нет. Вопросы преобразований геологической среды береговой зоны озера Байкал, формирования современной экзогеодинамической обстановки в условиях

техногенеза не освещены в должной мере. Озеро Байкал и его использование является эталонным примером формирования человеком природно-технической системы с использованием естественного резервуара гидроэнергетикой. Необходимо осветить вопросы, связанные с текущим состоянием берегов и актуализировать данные по протяженности генетических типов байкальских берегов, показать состояние береговых склонов и активность экзогенных геологических процессов в береговой зоне. Актуальная информация о этапах преобразования геологической среды берегов озера Байкал позволит оценить влияние гидроэнергетики на состояние берегов уникального озера, и явится основой для построения прогнозных вариантов реакции геологической среды на возможные техногенные изменения положения уровня в будущем вследствие регулирования стока крупной реки Селенги впадающей в озеро Байкал.

На территории Монголо-Сибирского региона активно ведется разработка месторождений полезных ископаемых, а решение вопросов устойчивости конструктивных элементов при разработке полезных ископаемых относится к одной из актуальных проблем современной инженерной геологии. Так, например, добыча коренных месторождений алмазов ведется с 50-х годов прошлого века. Всего в пределах Сибирской платформы выделено шесть потенциально алмазоносных субпровинций: Ангаро-Тунгусская, Байкало-Патомская, Присяянская, Якутская, Байкатская и Алданская. В пределах богатейшей Якутской кимберлитовой субпровинции открыты крупнейшие в мире кимберлитовые трубки Мир, Удачная, Интернациональная [Винокуров, Суходолов, 1998]. Разработка алмазных месторождений страны ведется в северных районах и осуществляется в большей мере открытым способом. Открытая разработка кимберлитовых месторождений ведется в сложных горно-геологических и горно-технических условиях, связанных с наличием многолетней мерзлоты до глубины 550 м, суровым климатом и глубокими открытыми разработки и др. [Алексеев и др., 2011; Слепцов, Курилко, 2013]. В пределах месторождений Мирнинского поля алмазоносной провинции кимберлитовые трубки прорывают вмещающие терригенно-карбонатные и галогенно-карбонатные породы нижнего палеозоя, имеют незначительную мощность перекрывающих отложений. Мощность перекрывающих ранне-, ниже-юрских отложений составляет: трубка Интернациональная – 2 – 9 м, им. XXIII съезда КПСС – 12 – 20 м, Дачная – 15 – 21 м. В пределах Алакит-Мархинского поля кимберлитовые тела перекрыты траппами пермо-триаса. Мощность перекрывающих трубку Юбилейную трапповых интрузий составляет 66 м, трубка Комсомольская перекрыта долеритами мощностью до 20 м, мощность перекрывающего траппового силла над трубкой Сытыканской колеблется от 5 до 72 м, трубка Заря перекрыта долеритами и туфами

мощностью до 103 м. Месторождения Далдынского поля относятся к числу открытых полей, не перекрыты ни осадочными, ни трапповыми образованиями – трубки Удачная и Зарница [Костровицкий и др., 2015]. В пределах Накынского кимберлитового поля алмазонасные трубки перекрыты мощной толщей терригенных, терригенно-карбонатных слаболитифицированных пород мезозоя и кайнозоя. Верхняя толща разреза мощностью до 100 м сложена слабоустойчивыми к выветриванию мезозойскими отложениями и древними корами выветривания (по материалам Нюрбинского ГОКа). Особенность литологического строения геологического разреза в пределах участка трубки Нюрбинской создает предпосылки для формирования опасных экзогенных геологических процессов, а при стечении отдельных факторов возможно проявление катастрофических процессов – смещение крупных масс горных пород, развитие оползней. На решение вопросов формирования экзогеодинамической обстановки в условиях открытой разработки месторождения, обеспечения безопасной работы предприятия, предотвращения развития чрезвычайных ситуаций, связанных с развитием экзогенных процессов на бортах карьера, нацелена еще одна задача данной исследовательской работы. Сюда входят вопросы оценки текущего инженерно-геологического состояния участков добычи полезных ископаемых, мониторинга компонентов геологической среды, оперативного анализа и принятия управленческих решений при разработке месторождений. В целях предотвращения развития катастрофических (быстротекущих) и опасных экзогенных геологических процессов на бортах карьера, способных привести к значительным экономическим ущербам, необходимо выполнение последовательных шагов по выявлению комплекса процессообразующих факторов, идентификации опасности экзогенных геологических процессов, разработке предупредительных мер по стабилизации состояния конструктивных элементов карьера.

Для Монголо-Сибирского региона в силу значительного разнообразия природно-климатических условий территории, сложных инженерно-геологических условий характерно развитие многих экзогенных геологических процессов, в том числе групп опасных и катастрофических процессов. Проблемы развития групп опасных и катастрофических процессов актуальны для всех территорий активного освоения и использования, особо остро такая проблема стоит для городских земель с плотной застройкой и постоянным проживанием людей [Осипов и др., 2017]. Еще одним важным направлением исследований данной диссертационной работы является определение влияния унаследованных природных факторов на формирование и развитие современных экзогенных процессов, катастрофических процессов в пределах городских территорий. В качестве объекта исследований выбрана территория города Улан-Батора, самого крупного

города Монголо-Сибирского региона, расположенного в межгорной долине. Поселение Улан-Батора имеет длительную историю освоения – упоминается в летописях с 1778 г. [Майдар и др., 1983]. В настоящее время городское население города Улан-Батора составляет более миллиона человек, 1/3 всего населения страны. В Улан-Баторе расположены промышленные предприятия, разветвленная инфраструктура, хозяйственные объекты, плотная жилая застройка. Формирование экзогеодинамической обстановки городской территории во многом предопределено морфометрическими особенностями горных и предгорных территорий в сочетании с природно-климатическими условиями района.

Геолого-геофизические исследования на территории Монгольской Республики проводились советскими специалистами в 80-х годах XX столетия (Советско-Монгольская геофизическая экспедиция). Было выполнено сейсмическое микрорайонирование отдельных территорий Монголии, определены границы наиболее сейсмически опасных участков. В состав работ входили инженерно-геологические исследования. Сотрудниками ПНИИС в связи с освоением и строительством различных объектов на территории Центральной Монголии выполнялись инженерно-геологические исследования. В монографии «Формирование инженерно-геологических условий Центральной Монголии» [Васильев и др., 1987] была дана оценка развитию экзогенных геологических процессов и их проявлениям на территории Центральной Монголии. В работах того периода отмечено, что наиболее широкое распространение имеют эрозионные процессы. Показано, что происходит усиление влияния техногенной нагрузки на развитие процессов, связанных с поверхностными водотоками. Так, на территории города Улан-Батора вследствие уничтожения растительного покрова в результате строительства и заселения юрточных и частных домов интенсивный характер приобрели процессы плоскостного смыва, овражной эрозии и селевые потоки. Скорость развития оврагов в лессах городов Улан-Батора и Дархана достигает 8 м/год, в их окрестностях – 3–4 м/год; за пределами городской территории она не превышает 3 м/год [Васильев и др., 1987]. Согласно прогнозной карте устойчивости и риска к природным и техногенным процессам, составленной в 2004 г. Балтын Батом для городской территории, г. Улан-Батор характеризуется средней, а на большей части – низкой степенью устойчивости. Низкая степень устойчивости геологической среды определяет вероятность возникновения катастрофических экзогенных геологических процессов флювиального генезиса, угрожающих жизни людей. Ранее проблема особенностей формирования катастрофических экзогенных геологических процессов, связанных с прохождением

ливневых и паводковых водных потоков на территории Улан-Баторской агломерации, предметно не рассматривалась.

Катастрофические процессы проявляются на городской территории в момент прохождения сильных ливневых дождей, формирование временных водных потоков значительной мощности в горных частях приводит к экономическим ущербам и даже к гибели людей. При прохождении атмосферного фронта над локальной территорией возникают ливни и временные водные потоки. При движении водных потоков в них могут быть вовлечены размытые массы горных пород, и тогда движение водокаменных потоков приобретает катастрофический характер. Важной задачей при исследовании предпосылок зарождения катастрофических процессов, связанных с интенсивными дождевыми осадками, является анализ морфометрических показателей анализируемой территории. Морфометрические параметры территории во многом определяют развитие генетических разновидностей катастрофических процессов, связанных с паводками в горных и предгорных районах [Angillieri, 2008; Waikar, Nilawar, 2014]. Анализ морфометрических параметров актуален для освоенной городской территории, где формирование временных водных потоков приводит к эволюционным преобразованиям компонентов геологической среды, изменению состояния природно-технической системы в целом. Учет природных факторов, способствующих формированию катастрофических процессов, инженерно-геологическое районирование территории – важный вопрос в обеспечении безопасности жизнедеятельности городского населения.

Выбранные в качестве ключевых объектов природно-технические системы, расположенные в пределах Монголо-Сибирского региона, представляют собой динамичные многокомпонентные системы и являются типичными примерами определенного вида техногенной нагрузки на геологическую среду. Все природно-технические системы созданы и управляются человеком. Каждая система имеет свои особенности и располагается в определенных структурно-тектонических и геологических условиях (рис. 1.2.), обладая своим набором природных и техногенных факторов.

Рассматриваемые ПТС являются своего рода аналоговыми моделями для выявления закономерностей формирования экзогеодинамических обстановок в условиях специфического вида техногенной нагрузки на геологическую среду, примером формирования экзогеодинамических обстановок, служащие основой для прогнозных построений развития подобных природно-технических систем в схожих природно-климатических и геолого-геоморфологических условиях.

При эксплуатации природно-технических систем на современном этапе развития требуется разумное соблюдение баланса между природным потенциалом территории, в частности геодинамической функцией геологической среды, и обеспечением хозяйственно-экономических потребностей человека, что является одной из глобальных проблем современного общества. Решение проблемы научно обоснованной организации среды обитания, гармоничного и безопасного использования геологической среды – еще одно направление исследований диссертационной работы. Геологическая среда любой территории земного шара неизбежно подвержена эволюционным преобразованиям. В то же время влияние техногенных факторов на протяжении всего периода эксплуатации природно-технических систем необходимо поддерживать в диапазоне допустимых нагрузок, так чтобы трансформации геологической среды не выходили за границы безопасного состояния геосистемы. Потеря устойчивого состояния при трансформации компонентов геологической среды приводит к зарождению и проявлению негативных геологических процессов, к деформации и разрушению технических объектов и /или деградации компонентов геологической среды с потерей экологических функций литосферы. Качественная эволюция геологической среды происходит в двух плоскостях: ухудшения качества за счет истощения запасов и развития неблагоприятных геологических процессов и других негативных последствий; улучшения и поддержания качества за счет целенаправленного регулирования и управления свойствами массивов горных пород, геологическими процессами, мониторинга, инженерной защиты и др. [Трофимов, Королев, 2013]. В.Т. Трофимовым и В.А. Королевым справедливо замечено, что трактовке категории «геологическая среда» на современном этапе развития общества должны быть присущи признаки ноосферы: разумность, экологичность, целенаправленность, управляемость, бесконфликтное существование с другими подсистемами. На поддержание качества и контроля состояния геологической среды, в стремлении к разумности и управляемости инженерно-хозяйственной деятельности человека, направлены усилия по разработке принципов экзогеодинамической безопасности геологической среды созданных природно-технических систем. На основе накопленного материала о состоянии компонентов геологической среды на этапах эксплуатации

природно-технических систем в регионе и опыта при их эксплуатации назрела необходимость обобщить подходы к обеспечению стабильного состояния природно-технических систем. Оценка геодинамической функции при эксплуатации технических объектов рассматривается как способность литосферы оказывать влияние на состояние биоты, безопасность и комфортность жизнеобеспечения человека через развитие природных и природно-техногенных геологических процессов и явлений [Трофимов, Зилинг, 2002]. Опасные и катастрофические экзогенные геологические процессы демонстрируют геодинамическую функцию литосферы и в то же время отражают этапы эволюционного преобразования геологической среды, определяя уровень безопасности природной среды для человека. Обеспечение экологической безопасности геологической среды в условиях возрастающих техногенных нагрузок с учетом геодинамической функции литосферы – пятое направление исследований и теоретических разработок диссертационной работы.

В основу инженерно-геологических исследований по выявлению современной динамики региональных экзогенных геологических процессов, формированию экзогеодинамических обстановок положен системный подход, представляющий новый этап развития теории и методологии общетеоретических исследований инженерной экзогеодинамики [Шеко и др., 1971; Литвин, 1989; Иванов, Тржцинский, 2001; Королев, 2007; Трофимов, 2008]. В работе использован широкий комплекс современных методов: инженерно-геологических [Методическое пособие..., 1984; Ломтадзе, 1977, 1990; Сергеев, 1978; Бондарик, 1981; Золотарев, 1990; Осипов и др., 1999; Иванов, Тржцинский 2001; Трофимов, Зилинг, 2002; Экологические функции литосферы, 2002; Осипов, Соколов, 2013; Инженерная геология России, 2013] геокриологических [Основы мерзлотного прогноза..., 1974; Методика мерзлотной съемки..., 1979; Ершов и др., 1976, 1999; Методы геокриологических исследований, 2004], климатологических [Будыко, 1980; Величко, 1973; Котляков, 1994; Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., 2011] и других научных методов геологического направления.

Для верификации полученных в ходе обобщения данных по состоянию геологической среды на разных этапах эксплуатации крупных природно-технических систем, получения новых данных о сформировавшихся экзогеодинамических обстановках в регионе был выполнен цикл экспедиционных работ в прелах различных природных и природно-техногенных систем, расположенных в Монголо-Сибирском регионе. Специфика объектов исследований во многом определяла выбор методов и подходов к исследованию состояния геологической среды. Для анализа состояния крупных природно-технических систем – водохранилищ, оз.Байкал, территорий городских

агломераций был использован метод ключевых участков с получением точных количественных данных о динамике развития экзогенных процессов в разных геолого-геоморфологических условиях. Полевые работы на ключевых участках включают в себя аэрофотосъемку (дистанционный пилотируемый летательный аппарат ДПЛА-DJI Inspire 1pro, оснащенный камерой Zenmuse 5X с разрешением 3840x2160 пикселей), подводное эхолотирование (навигационный приемник GPSMAP 585), построение профилей в пределах закрепленных реперов, прямые измерения деформаций поверхности в результате развития экзогенного геологического процесса (лазерный дальномер Leica Disto), съемка элементов морфологии поверхности и построение плана участка (Trimble TS 635 (5")), отбор образцов для анализа среды развития процессов осуществлялся с использованием малогабаритной буровой установки.

В пределах ангарских водохранилищ детальные инженерно-геологические работы проведены на 14 ключевых участках, оз. Байкал – 15 оборудованных стационаров, в пределах Улан-Баторской агломерации организована система мониторинговых площадок, состоящая из 10 оборудованных участков. Для получения актуальной информации о экзогеодинамической обстановки на месторождении по добыче полезных ископаемых в пределах бортов карьеров проводятся обследования состояния конструктивных элементов 2 раза в год с детальным картированием и описанием форм проявления экзогенных геологических процессов. В среднем за один сезон закартированы, с сохранением координатных привязок от 50 до 70 точек наблюдений. На основании выполненных полевых работ, полученных количественных данных о развитии экзогенных геологических процессов, анализе условий и факторов, влияющих на изменение состояния геологической среды выполняется камеральная обработка фактического материала, построение специализированных инженерно-геологических карт, схем, выявление активности и интенсивности экзогенных процессов, расчет плотности форм, пораженности и других показателей динамики развития современных экзогенных геологических процессов. В ходе работ проводится комплексирование методов инженерной геологии, геокриологии, геоморфологии, геофизики и других смежных научных направлений и подбираются наиболее результативные методики работ на участке. Для изучения и оценки температурного состояния горных пород использованы термометрические скважины с установленными в них термокосоми и логгерами с автоматическим режимом записи данных по температуре.

Комплекс лабораторных исследований состава, структуры и физико-механических свойств дисперсной фракции отобранных образцов, выполнены в ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН, лаборатории инженерной геологии и

геэкологии с применением трех способов подготовки образца (пипеточный метод) и расчетом параметров микроструктуры [Рященко, 2010], петрографическое изучение горных пород выполнялось в лаборатории магматизма древних платформ ИЗК СО РАН. Проведены определения некоторых показателей физических (плотность, влажность) и физико-химических свойств отложений (пластичность, седиментационный объем (V), объемная усадка (V_y), набухание, реакция среды (pH) и емкость катионного обмена). Название грунта давалось по данным гранулометрического анализа с полудисперсным (стандартным) способом подготовки образца с учетом особенностей микроструктуры [Рященко и др., 2000; Ryashcenko et al., 2008].

Глава 2. Зона влияния ангарских водохранилищ

Каскад ангарских водохранилищ состоит из искусственно созданных водных резервуаров в долине р. Ангары. Гидроэлектростанции (ГЭС) построены в целях выработки электроэнергии и обеспечения экономической рентабельности работы крупных производственных предприятий Монголо-Сибирского региона.

2.1. Климатические и инженерно-геологические условия

Климатические условия

Климатические особенности бассейна реки Ангары обусловлены ее внутриматериковым положением, расчлененностью рельефа с абсолютными отметками 500–800 м. Климат в районе водохранилища резко континентальный, с суровой продолжительной, но сухой зимой и теплым, с обильными осадками летом.

Холодный период времени имеет продолжительность 5–6 месяцев. Значительная широтная протяженность и сложность рельефа территории приводит к большому разнообразию в распределении температуры. Осенью устойчивый переход температуры через 0 °С устанавливается во второй декаде октября [Братское водохранилище, 1963; Гидрометеорологический режим1978]. Самым холодным месяцем в году является январь. Температура воздуха в январе понижается до –35 ° –42 °С. Число дней с минимальной температурой воздуха ниже –30 °С составляет около 30, в северных районах 30, и в южных районах 2–5 дней [Государственный доклад ..., 2013]. В последние годы отмечается повышение среднегодовой температура воздуха на исследуемой территории. Так, в 2017 году зафиксировано превышение многолетних значений температур воздуха на 1–3 °С за счет положительных температурных аномалий, отмечавшихся большую часть года [Государственный доклад 2018].

Территория в районе водохранилищ характеризуется глубоким сезонным промерзанием грунтов, с мощностью деятельного слоя до 3 м [Лешиков, 1984]. Сезонное промерзание находится в тесной зависимости от климатических, грунтовых и гидрогеологических условий участка, предопределяющих изменчивость глубины промерзания и зональный характер его распределения. Глубина промерзания из года в год варьируется и в значительной мере зависит кроме перечисленных выше факторов и от мощности снежного покрова. Высота снежного покрова в среднем составляет 30–50 см, в северных районах 50–70 см, в южной части – 10 см [Филиппов, 1983; Государственный доклад... 2018]. Разница в глубинах промерзания варьируется от 0,30 до 0,80 м. Раннее выпадение снега и быстрое нарастание его мощности предохраняют грунты от резкого

охлаждения. В зависимости от мощности снежного покрова глубина промерзания грунтов при одинаковой их влажности может достигать различий в 0,8 м [Лешиков, Серов, 1986].

Криогенный фактор играет определяющую роль при формировании береговых склонов водохранилищ. Наблюдения, проведенные Ф.Н. Лешиковым на берегах ангарских водохранилищ, показали, что формирование береговой линии с наступлением отрицательных температур воздуха и образованием заберегов, а затем и установлением ледового покрова не прекращается. В результате высокой солнечной радиации развивается термоэрозия, термоденудация грунта в береговой зоне водохранилищ. Величины разрушения и отступления бровки берегового склона под действием криогенных процессов (температурное и морозное выветривание пород, промерзание и оттаивание, миграция влаги и переход ее в лед) в отдельные годы сопоставимы с результатами воздействия ветроволновых нагрузок на склон [Лешиков, Спесивцев. 1984].

Переходные сезоны довольно кратковременны: весна 2,0 – 2,5 месяца, а осень – 1,5 месяца. Устойчивый переход среднесуточной температуры воздуха через 10 °С на большей части территории происходит во второй половине мая (местами в южных районах в начале месяца, а в северных – в начале июня). Наиболее высокая температура воздуха в летний период может достигать в отдельные дни 34–36 °С.

В теплый период времени в результате оживления циклонической деятельности заметно возрастает степень покрытия неба облаками. В этот период года выпадает до 65–85 % годовой суммы осадков, при этом доля осадков за июль-август составляет около 25 % от годовой нормы. Среднегодовое количество осадков колеблется от 356 (Братск) до 463 мм (Усолъе-Сибирское) [<https://ru.climate-data.org>].

Ветровой режим над территорией водохранилищ является одним из природных факторов, во многом предопределяющих особенности развитие береговой зоны. Ветровой режим водохранилищ определяется циркуляцией атмосферы, рельефом местности и другими физико-географическими условиями района. В течение всего года преобладающими являются ветры западного и северо-западного направления. Ветры других направлений имеют меньшую повторяемость и длительность. Годовой ход скорости ветра характеризуется двумя хорошо выраженными максимумами; максимумы скорости отличаются не везде одновременно: в северных районах - в апреле и ноябре, а в южных – в мае и октябре [Гидрометеорологический режим, 1978]. Различия ветровой обстановки над водохранилищами отражаются и в формировании различных волновых условий береговой зоны. Максимальная величина энергии волнения составляет 200 тыс. тм. на погонный метр берега Иркутского водохранилища, 500 тыс. тм на Братском, 900 на Усть-Илимском. Максимальная высота волн может достигать 3,5 м в расширениях

Братского и Усть-Илимского водохранилищ и около 2 м на Иркутском водохранилище [Овчинников и др., 1999].

Геоморфологические и структурно-геологические условия

Территория ангарских водохранилищ расположена в пределах Среднесибирского плоскогорья, рельеф которого формировался на протяжении длительного периода развития Сибирской платформы. Длительное континентальное развитие Сибирской платформы, протекавшее в условиях преимущественно устойчивых, нарастающих положительных тектонических движений, сопровождалось интенсивным размывом склоновых отложений и сносом материала. В результате с платформы были снесены огромные толщи пород и на большей ее части на поверхность были выведены древние палеозойские свиты с останцами древних кор выветривания. Сформировался глубокий денудационный врез [Коржуев, 1974].

Главный этап неотектонических поднятий, охвативший довольно длительный (эоплейстоценовый) отрезок геологического времени, состоял из целого ряда отдельных тектонических импульсов, чередовавшихся с короткими отрезками относительного покоя. В этот период времени долина реки Ангары приобрела свой современный вид [История развития..., 1971]. В неоген-четвертичный период происходили медленные прерывистые поднятия, стимулирующие тенденцию рек к врезанию и формированию долин. В долине реки Ангары до наполнения водохранилищ было установлено 9–10 террасовых уровней. Русловая фация трассовых комплексов состоит из галечников и песков с линзами гравия и гальки.

На этом участке Сибирской платформы развит трапповый магматизм, наложивший определенный отпечаток на рельеф региона. Развитие вулканических и пластовых плато протекало по типу педипленов с образованием характерных останцовых столовых возвышенностей [Соколов, 1955; Коржуев, 1959]. Междуречные пространства образуют два уровня водораздельных поверхностей. На осадочных породах палеозоя создана единая выровненная поверхность высотой 300–650 м – трапповое плато. Среди водоразделов, сложенных траппами, широко распространены возвышенности с ровной, реже пологоволнистой поверхностью. Нижняя водораздельная поверхность представляет собой плоские широкие пологовсхолмленные пространства, которые лишь в местах распространения осадочных и туфогенных отложений, интродуцированных траппами, осложняются появлением отдельных гряд и холмов. Морфология склонов находится в прямой зависимости от литологии коренного субстрата. Пологие, спокойно сливающиеся с днищами долин склоны, обычно характерны для участков, сложенных палеозойскими и мезозойскими осадками. На участках развития траппов склоны имеют резко выраженные

формы, как правило, вогнутый профиль и значительную крутизну [Овчинников и др., 1999].

В структурно-геологической характеристике Сибирская платформа имеет этажное строение. Нижний структурный этаж слагают сложнодислоцированные и сильнометаморфизованные формации архейского и раннепротерозойского возраста, образующие фундамент платформы [Инженерная геология СССР, 1977]. Верхний структурный этаж Сибирской платформы слагают отложения осадочного чехла, соответствующие палеозойскому, мезозойскому и кайнозойскому этапам (рис. 1.2, Глава 1).

Палеозойские отложения, отражая общую тектоническую структуру региона, погружаются с юго-запада на северо-восток, последовательно замещаясь более молодыми породами. Наиболее древняя молассовидная нижнекембрийская формация представлена доломитами, песчаниками, аргиллитами и конгломератами. Нижне-среднекембрийские отложения представлены климинской, зелеевской, усольской, бельской, булайской, ангарской и литвинцевской свитами гипсово-соленосно-карбонатной и терригенно-карбонатной формации (в основном доломиты и известняки); верхоленской свитой красноцветной терригенно-карбонатной формации (аргиллиты, мергели и алевролиты). Аргиллиты и алевролиты красноцветной формации сложены глинистыми отложениями, интенсивно пигментированными гидроокислами железа, содержат незначительную примесь алевролитовых частиц. По химическому составу глинистые породы в основной своей массе состоят из алюмосиликатов с повышенным содержанием окислов кальция, железа. Результаты химического анализа глинистых фракций свидетельствуют о их каолинит-гидрослюдистом составе [Овчинников и др., 1999]. Красноцветные терригенно-карбонатные породы склонны к пластическим деформациям типа глубинной ползучести, что создает предпосылки для формирования блочных оползней выдавливания на береговых склонах [Козырева, 2002]. Породы ордовикского возраста представлены доломитами, известняками, водорослевыми и глинистыми известняками, известковистыми песчаниками, песчаниками и объединены в терригенно-карбонатную (усть-кутская свита) и терригенную формации (ийская, балараноская, мамырская, братская свиты). Ордовикские песчаники мелко- и среднезернистые, кварцевые, кварц-полевошпатовые с доломитовым, глинисто-доломитовым цементом, содержащим гидроокислы железа. Иногда песчаники содержат кристаллы гипса и зерна кальцита. Структура их псаммитовая или псаммито-алевролитовая; текстура массивная, редкослоистая. Обломочный материал представлен кварцем, полевым шпатом, халцедоном, слюдой.

Карстовые пустоты размером до 1,0 м и большая пористость присущи известковистым разностям отложений терригенно-карбонатной формации. Поры и пустоты выполнены вторичным кальцитом и глинами [Серов, Тржцинский, 1979]. Силурийские отложения завершают разрез нижнепалеозойской толщи. Они представлены алевролитами, песчаниками, мергелями и доломитами. Отложения силурийского возраста выходят на дневную поверхность в районе Усть-Илиского водохранилища, обнажаясь полосой междуречья Ангары и Илима.

В течение перми и триаса имел место трапповый магматизм, охвативший обширную территорию платформы. Напряженные вулканические и магматические процессы привели к образованию согласных и пологосекущих силлов, реже даек, штоков и интрузивных тел неправильной формы. Вулканический материал, попадая в различные условия, давал начало различным породам. Нижнетриасовые образования (корвунчанская и тутончанская свиты) сложены туфами, туфитами, туфопесчаниками, туфоалевралитами [Богучанское водохранилище, 1979]. Пластовые интрузии приурочены к отложениям ордовика, секущие тела развиты среди пород кембрия и ордовика. Среди траппов выделяются афанитовые долериты, габбро-долериты, пегматоидные и трахитоидные долериты, долерит-порфириды, долерит-пегматиты. Интрузивные породы характеризуются высокими значениями прочности. Потеря прочности от суммы воздействия факторов физического выветривания в них составила 4 % [Братское водохранилище..., 1963].

Породы юры (присянская, черемховская, заларинская, чайкинская, камалинская и бородинская свиты), карбона (тушимская, катская свиты) и перми (бургуклинская, пеляткинская свиты), представленные переслаивающимися песчаниками, алевролитами, аргиллитами, глинами, конгломератами, углями большой мощности, объединены в угленосно-терригенную формацию.

Кайнозойские неоген-четвертичные образования сложены различными геолого-генетическими типами рыхлых пород – делювиальными, аллювиальными, элювиальными и пролювиально-делювиальными грунтами. Мощность рыхлых отложений в зоне ангарских водохранилищ колеблется в значительных пределах – от 0,5 до 10 м [Инженерная геология СССР, 1977; Братское водохранилище, 1963].

Тектонический план, заложенный при формировании кристаллического фундамента, претерпел изменения в палеозое и получил развитие в движениях мезо-кайнозоя. Тектонические трещины характеризуются значительной протяженностью и выдержанностью по направлению. Тектоническая трещиноватость закономерно возрастает от более молодых толщ осадочных отложений к более древним, а также от

периферии складок к их ядрам [Чарушин, 1957]. Исследователи, работавшие на Сибирской платформе, указывали на совпадение направлений долин рек с одной из региональных систем трещин – северо-западного ($303\text{--}340^\circ$) и северо-восточного ($40\text{--}62^\circ$) простирания [Чарушин, 1957; Соколов, 1961; Тржцинский, 1969].

В сейсмическом отношении территория Сибирской платформы не однородна. Наиболее сейсмически активна южная часть Иркутского амфитеатра, так как она расположена в непосредственной близости от сейсмически активного Монголо-Байкальского пояса. Сибирская платформа относится к числу древнейших континентальных блоков земной коры [Замараев, 1967; Гладкочуб и др., 2006], сильные или умеренные землетрясения происходят здесь сравнительно редко. В течение длительного времени Сибирская платформа рассматривалась как практически асейсмичная территория [Голенецкий, Мишарин, 1978]. В последнее время установлено, что Сибирская платформа обладает собственной природной сейсмичностью [Семинский, Радзиминович, 2007; Seredkina et al., 2015] (рис. 2.1).

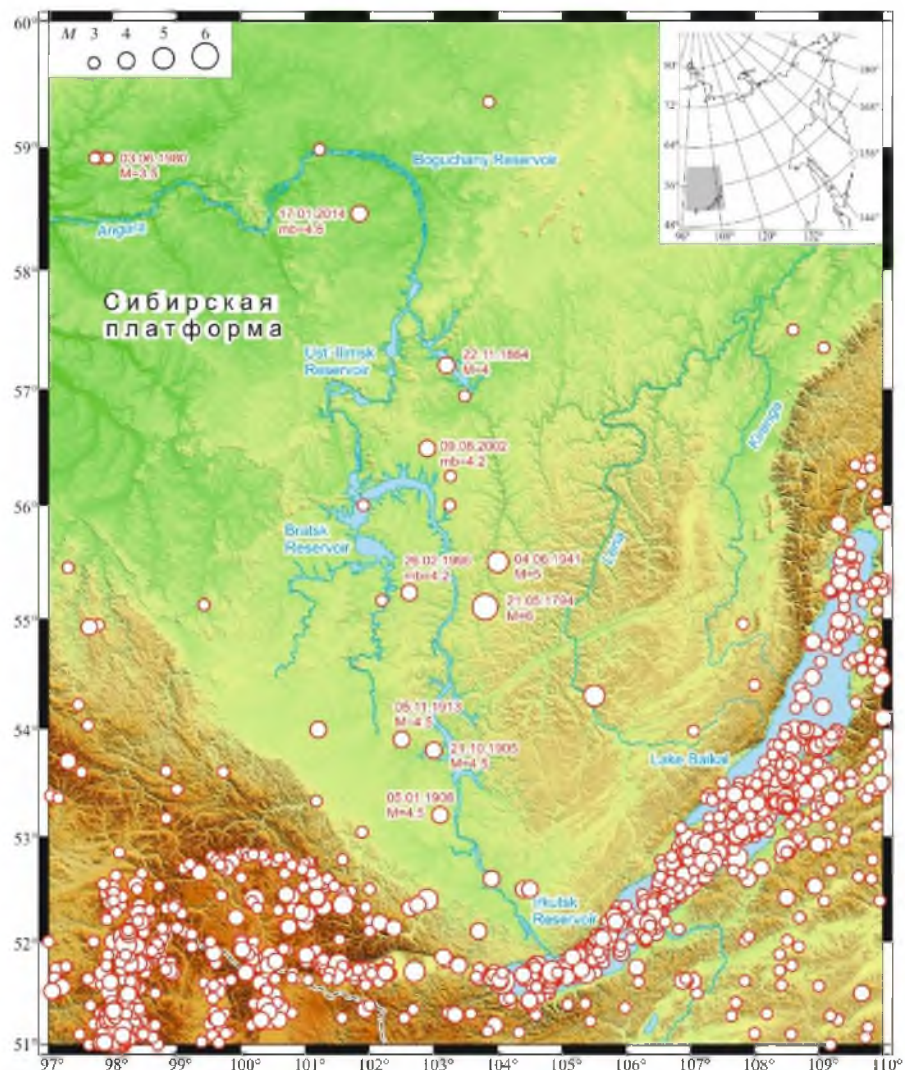


Рисунок 2.1. Распределение сейсмических событий [Семинский, Радзиминович, 2007] в районе ангарских водохранилищ.

В гидрогеологическом отношении каскад водохранилищ расположен на территории Ангаро-Ленского артезианского бассейна, за исключением небольших участков, расположенных на ее южной (Байкальская гидрогеологическая складчатая область) и северной (Тунгусский артезианский бассейн) границах [Овчинников и др., 1999]. Водно-коллекторские свойства в зоне интенсивного водообмена предопределяются основными типами пустотности вмещающих горных пород, выделяются трещинно-пластовые, трещинно-жильные и трещинно-карстовые воды.

Водообильность горных пород характеризуется высокой неравномерностью. На одном и том же расстоянии от уреза водоема водообильность пород может быть как очень высокой, так и низкой. В прибрежной полосе преобладает высокий удельный дебит скважин. Высокие показатели дебита характерны для скважин, пройденных в карбонатных и сульфатно-карбонатных породах, которые сильно поражены карстом. Влияние водохранилища на водообильность закарстованных пород прослеживается на расстоянии до 2 км, в песчано-глинистых отложениях эта величина снижается до 1 км. Отмечается снижение водообильности не только при удалении от водохранилища в глубину склона, но и по разрезу. До глубины 60 м от уровня водохранилища, соответствующего отметке НПГ, наблюдается хаотичное распределение значений величины удельного водопоглощения. В этом интервале глубин сосредоточена наиболее динамичная часть гидрогеологического разреза в сфере дренирующего воздействия р. Ангары. Ниже по разрезу породы имеют очень низкую проницаемость и водообмен становится затрудненным [Овчинников и др., 1999]. Чередование в разрезе зон высокой проницаемости и водоупоров, резкая неоднородность фильтрационных свойств приводят к возникновению и усилению развития экзогенных процессов в зоне влияния водохранилищ.

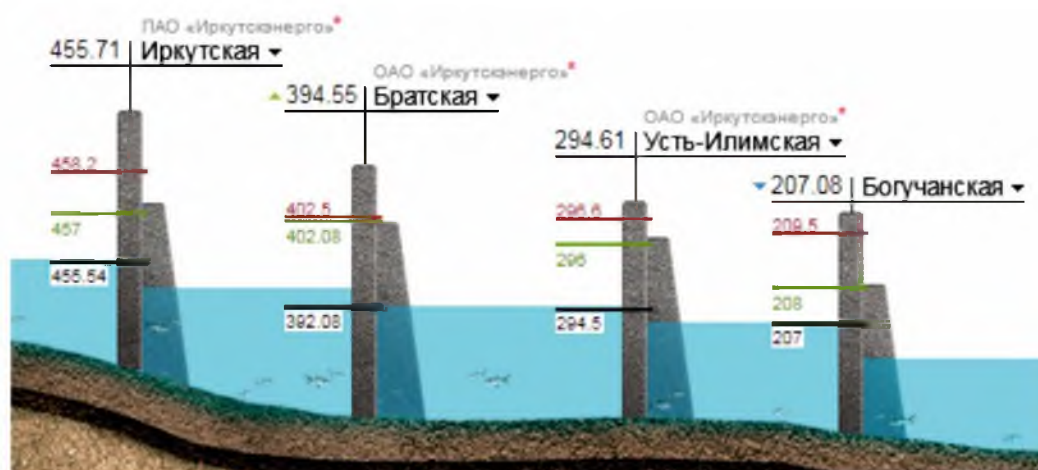
Зеркало уровня подземных вод в зоне влияния водохранилищ с разной степенью запаздывания повторяет изменения уровня водохранилищ. В карбонатных и сульфатно-карбонатных отложениях ордовикского и кембрийского возраста запаздывание не превышает 2 сут на расстоянии более 1 км от уреза. В песчаниках различного возраста величина запаздывания изменяется от 1 сут в 0,5 км от уреза до 8 сут в 1,5 км, в глинисто-мергелистых породах в полосе шириной до 500 м она достигает 39 сут [Овчинников и др., 1999], что демонстрирует в сезонном и многолетнем ритме способность воспроизводить условия заполнения водохранилищ, а зона подпора становится соизмеримой с величиной предельной сработки уровня [Шенькман, 1986]. Находясь в постоянном динамичном состоянии, подземная гидросфера осложняет инженерно-геологическую ситуацию,

способствует развитию и проявлению карста, суффозии, оползней и других экзогенных процессов.

Многолетнемерзлые породы на берегах ангарских водохранилищ не имеют широкого распространения, это немногочисленные линзы и острова по долинам ангарских притоков. Острова и линзы многолетнемерзлых пород могут достигать в плане нескольких сотен метров, мощность их изменяется от 0,5 до 20 м, температура колеблется от $-0,1$ до $-1,1^{\circ}\text{C}$. В пределах территории отмечается глубокое сезонное промерзание (до 4,0 м) – на заболоченных участках, в днищах глубоких балок, на затененных и залесенных склонах северной экспозиции. Развита геокриологические процессы и явления – бугры пучения, термокарст, трещинно-полигональные формы микрорельефа, наледи [Богучанское водохранилище, 1979].

Эксплуатационные особенности водохранилищ

Каскад возведенных плотин гидроэлектростанций (рис. 2.2) включает в себя Иркутское, Братское, Усть-Илимское и Богучанское водохранилища. Регулируемые водоемы долинного типа протянулись с юга на север, от истока р. Ангары на расстояние более 850 км до места строительства плотины Богучанской ГЭС (г. Козинск, Красноярский край). Ширина искусственных водоемов на отдельных участках достигает 12–15 км, а протяженность искусственно созданных берегов составляет более 8 500 км (табл. 2.1). Это крупные и очень крупные (по площади), очень глубокие равнинные водохранилища [Правила использования водных ресурсов, 2015 <http://docs.cntd.ru/document/902154600>].



— ФПУ – форсированный подпорный уровень, максимальная технически возможная отметка наполнения водохранилища, м
 — НПУ – нормальный подпорный уровень, отметка полного наполнения водохранилища в обычных условиях, м
 — УМО – уровень мертвого объема, отметка предельной сработки водохранилища, м

Уровень – текущая отметка уровня воды в водохранилище на 8:00 (МСК), м

Свободная ёмкость – свободный объем водохранилища, разница между текущим уровнем и НПУ, км³

Приток – количество воды, поступившей в водохранилище за предыдущие сутки, м³/с (среднесуточное значение)

Общий расход – общее количество воды, пропускаемой через гидроузел (турбины и водосбросы) за предыдущие сутки, м³/сек (среднесуточное значение)

Расход через водосбросы – количество воды, сбрасываемой через водосбросы мимо турбин за предыдущие сутки, м³/с (среднесуточное значение)

Рисунок 2.2. Гидроэлектростанции на реке Ангаре (по материалам РусГидро <http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/?date=2018-04-15>).

Таблица 2.1

Общая характеристика водохранилищ ангарского каскада ГЭС
 (по материалам [Овчинников и др., 1999], с дополнениями)

Водохранилище (годы наполнения)	Отметка НПГ, м	Объем, км ³	Площадь, км ²	Ширина макс., км	Глубина макс., м
Иркутское (1956–1962 гг.)	457	2,1	154	3,5	35
Братское (1961–1967 гг.)	401,6	169,3	5450	17	150
Усть-Илимское (1974– 1976 гг.)	296	59	1839	12	100
Богучанское (2012–2015 гг.)	209,5	58,2	2326	13	75

Эксплуатационный режим ангарских водохранилищ имеет сложный порядок управления гидротехническими узлами каскада электростанций, во многом зависящий от естественной водности бассейна реки Ангары в годовом и многолетнем циклах, технического регулирования и направлен на выработку электроэнергии, на решение хозяйственных задач: судоходства, лесосплава, рыболовства, орошения и др., связанных с использованием водных ресурсов региона.

Эксплуатационный режим Иркутского водохранилища

Параметры эксплуатации Иркутского водохранилища в последние годы, начиная с 2001 г., регламентируются законодательно, с учетом охраны природной среды озера Байкал. В 1959–2000 годах уровни стояния водного зеркала водохранилища колебались в пределах 2,2 м, что отражалось на активизации береговых процессов. В марте 2001 года постановлением Правительства Российской Федерации были определены предельные значения уровня озера при осуществлении хозяйственной и иной деятельности. Отметки уровня были зафиксированы в пределах 1 м – минимальная 456 м, а максимальная 457 м (в Тихоокеанской системе высот). Амплитуда колебания уровня воды была зафиксирована в пределах 1,05 м (с 2001 по 2015 г.) (рис. 2.3).

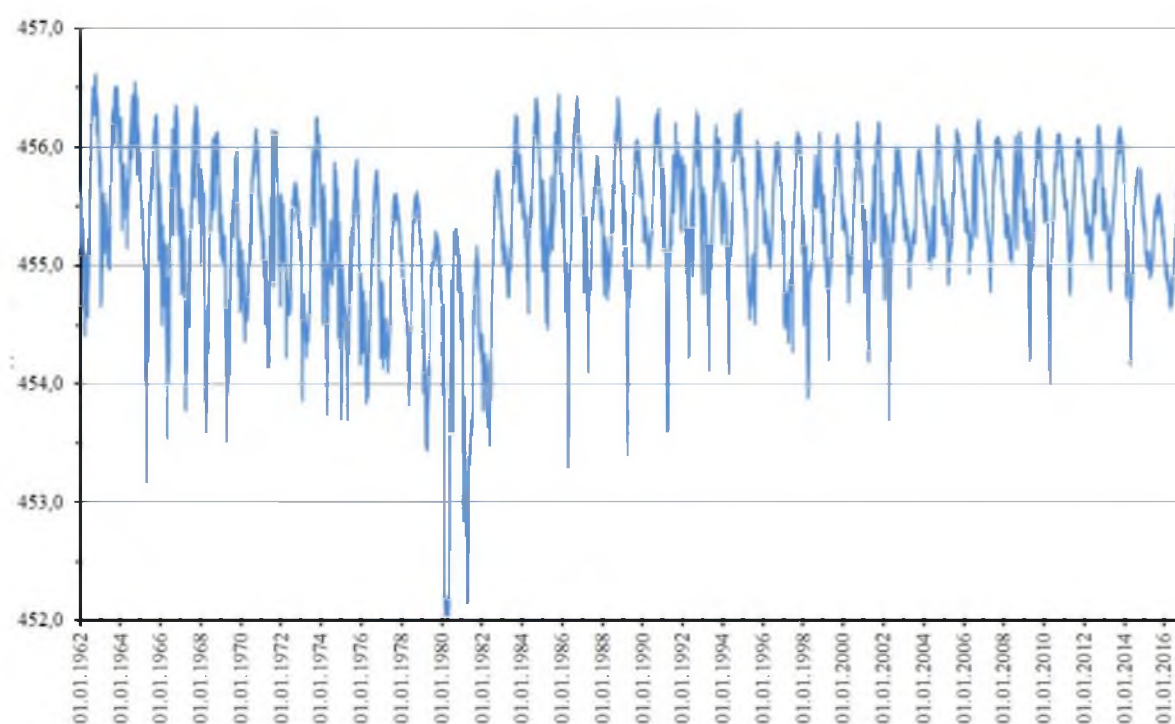


Рисунок 2.3. Колебание уровня Иркутского водохранилища в 1962–2017 гг. (по данным Гидрометеорологической службы).

Природно-климатические аномалии лета 2014 года привели к дефициту осадков и снижению уровня воды в водохранилище на 0,28 м ниже среднееголетних значений. К апрелю 2015 года уровень озера Байкал опустился до отметки 455,87 м, преодолев нижнее значение границы минимально допустимого уровня, определенного Постановлением правительства РФ № 234 от 2001 года. В 2015 году было принято Постановление Правительства № 97, допускающее использование водных ресурсов озера ниже установленного минимального значения уровня в объеме, обеспечивающем функционирование водозаборных сооружений объектов экономики и социальной сферы в нижнем бьефе Иркутского гидроузла. Это позволило достичь оптимального режима

работы Иркутского гидроузла, обеспечив необходимые минимальные сбросные расходы для гарантированного бесперебойного водо-, тепло- и энергоснабжения населения и объектов экономики в маловодный период. В условиях экстремально маловодного периода в 2014–2017 годах уровень воды в озере Байкал по состоянию на 7 ноября 2017 года составил 456,23 м, что на 0,14 м ниже, чем на тот же период 2016 года, несмотря на работу Иркутского гидроузла с минимальными сбросными расходами. 1 июля 2016 года Постановлением Правительства № 626 определены максимальные и минимальные значения уровня озера Байкал на 2016–2017 гг. (Постановление Правительства от 1 июля 2016 года № 626 «О максимальных и минимальных значениях уровня воды в озере Байкал в 2016–2017 годах»). Максимальное и минимальное значения уровня воды в озере Байкал в период средней водности установлены соответственно на отметках 457 и 456 м (в Тихоокеанской системе высот); минимальное значение уровня воды в озере Байкал в период малой водности (маловодный период) на отметке 455–454 м; максимальное значение уровня воды в озере Байкал в период большой водности (многоводный период) на отметке 457–485 м. В декабре 2017 года правительством принято Постановление № 1667, в котором до 2020 г. продлены дифференцированные максимальный и минимальный уровни озера Байкал в зависимости от условий водности – нормальной, экстремально высокой и экстремально низкой. Таким образом, с учетом природно-климатических особенностей для Иркутского водохранилища с 2016 по 2020 г. диапазон амплитуд колебания уровня увеличен до 2,31 м.

Эксплуатационный режим Братского водохранилища

Братское водохранилище – водоем многолетнего регулирования, и он самый крупный искусственный резервуар в Байкало-Ангарской гидросистеме. Максимальная амплитуда колебания уровня воды за период эксплуатации достигла 9,7 м, проектно допустимая величина – 10 м (рис. 2.4).

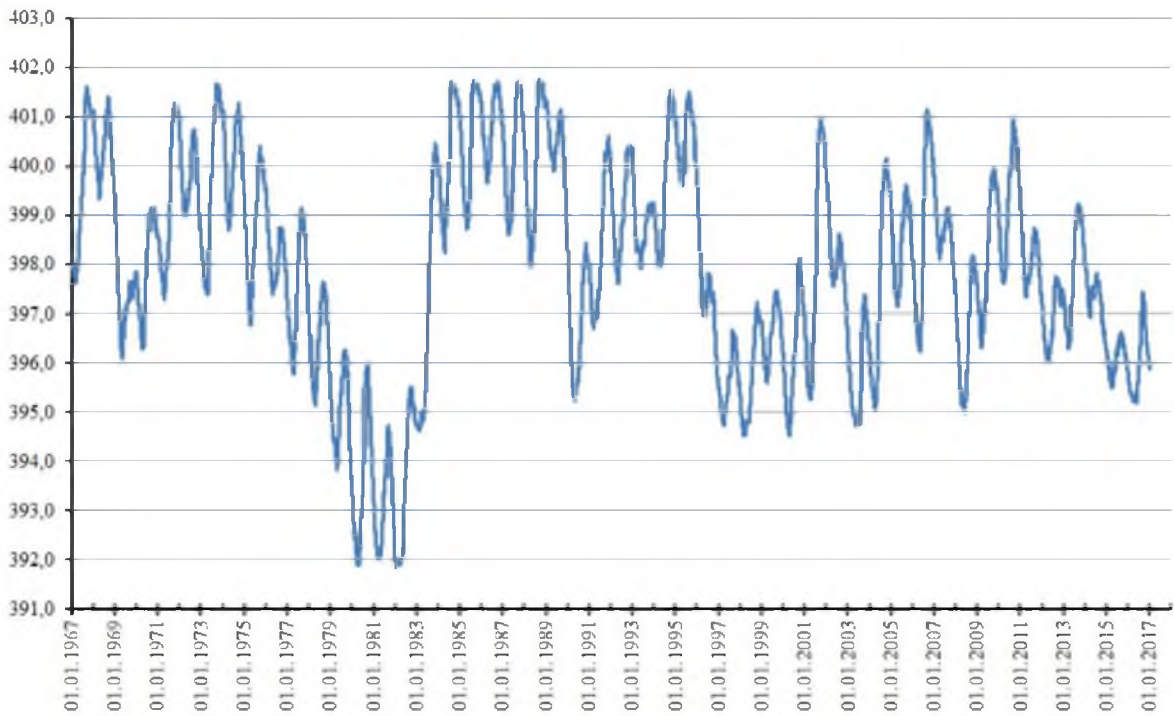


Рисунок 2.4. Колебание уровня воды Братского водохранилища в 1967–2017 гг. (по данным Гидрометеорологической службы).

Начиная с 2000 г. колебания уровня водохранилища носят неравномерный характер. Нет периодов длительного стояния на одной отметке или многолетних периодов повышения-понижения уровня. Происходит постоянная смена положения уровня, как в сторону повышения, так и в сторону стремительного последующего понижения. За период с 2000 г. амплитуда колебания составила 6,58 м, годовые колебания (от минимальных значений до максимального положения уровня воды в водохранилище) составили 2,57 м.

Эксплуатационный режим Усть-Илимского водохранилища

Усть-Илимское водохранилище – водоем сезонного регулирования. За последний многолетний период эксплуатации амплитуда колебания уровня составила 1,66 м (рис. 2.5), положение отметок уровня воды в водохранилище соответствует Тихоокеанской системе высот и соответствует эксплуатационным параметрам используемого объекта, а также сезонному регулированию в пределах 1 м.

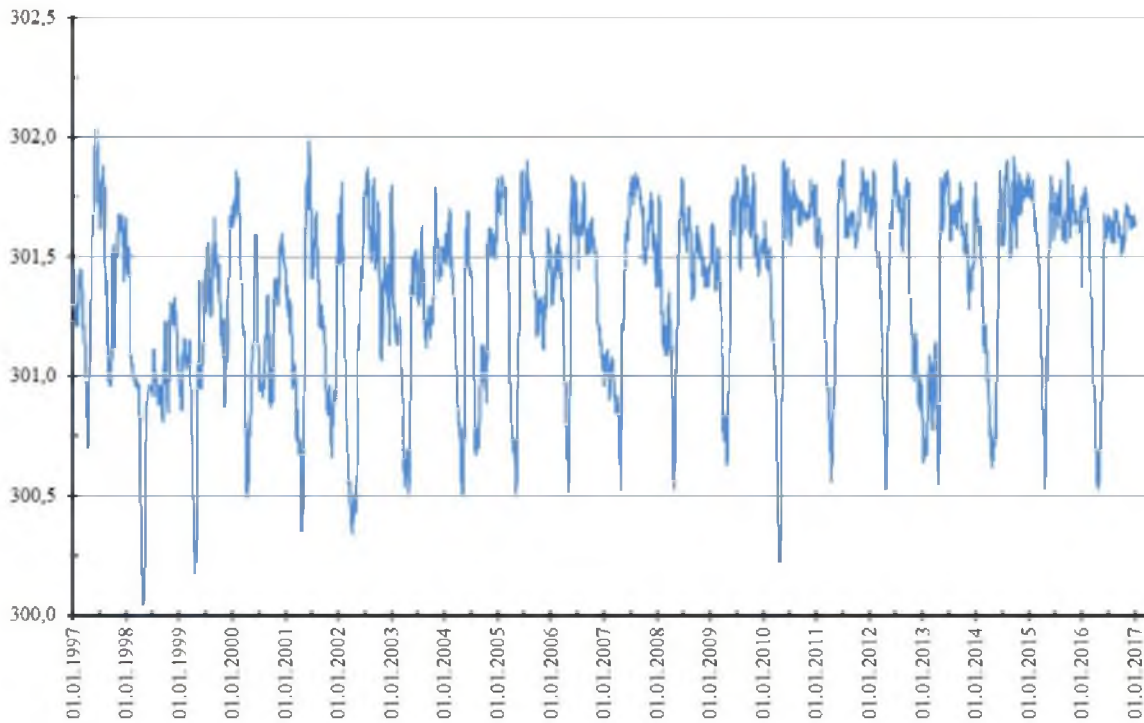


Рисунок 2.5. Колебание уровня Усть-Илимского водохранилища в 1997–2017 гг. (по данным Гидрометеорологической службы).

Эксплуатационный режим Богучанского водохранилища

Богучанское водохранилище является четвертым в каскаде ГЭС. Строительство плотины было начато в 1974 году. Наполнение водохранилища началось только в 2012 году. Резервуар наполнен до отметок НПУ летом 2015 года. Проектная амплитуда колебаний уровня водоема составляет 1 м. Период существования водоема к настоящему времени составляет 2 года и характеризуется активным формированием береговой линии водоема, зоны подпора подземных вод и активной перестройкой компонентов геологической среды прилегающих территорий. Развитие берегов и ложа водохранилища происходит в соответствии с прогнозно-расчетными параметрами проекта [Пережилин и др., 2015].

В целом, эксплуатационный режим технического объекта и положение уровня воды в водохранилищах – очень важный фактор при оценке эволюционных преобразований геологической среды прилегающих территорий. Иркутское и Усть-Илимское водохранилища характеризуются сезонным типом регулирования уровня воды в водоеме, с величиной сработки около 2 м. Для Братского водохранилища характерен многолетний тип регулирования с допустимой амплитудой колебания уровня до 10 м. Уровень сработки Богучанского водохранилища в многолетнем плане может достигать 2 м, сезонного – в пределах 1 м. По глубине сработки уровней воды в каскаде выделяются две группы водоемов: с небольшой сработкой (от 1 до 3 м) – Иркутское, Усть-Илимское,

Богучанское водохранилище и со средней сработкой (от 3 до 10 м) – Братское водохранилище. Годовой ход уровня на Иркутском и Братском водохранилищах характеризуется сезонной цикличностью: максимальные отметки отмечаются в осеннее время, минимальные – весной. Осенний штормовой период совпадает с максимально высокими годовыми отметками уровня воды в водохранилище. Отличительной особенностью Усть-Илимского водохранилища в Ангарском каскаде является то, что максимальные уровни приходятся на июнь – первую декаду сентября. А в осенний период, соответствующий штормовому периоду, максимальное положение уровня воды пройдено и уровень находится на более низких отметках. В осенне-зимний период происходит сработка воды в резервуаре.

2.2. Экзогенные геологические процессы в зоне влияния водохранилищ

Искусственные водоемы являются мощным источником воздействия на прибрежные массивы горных пород, вызывая активизацию и развитие различных экзогенных геологических процессов в зоне влияния. Переработка береговых склонов складывается из совокупности развития разных экзогенных геологических процессов, обуславливающих перестройку компонентов геологической среды в зоне влияния водоема на прилегающих территориях и берегового склона. Далее рассмотрим экзогенные геологические процессы, наиболее динамично развивающиеся в ходе эксплуатации водохранилищ.

Абразия

Абразионный процесс на берегах водохранилищ – техногенно-спровоцированный и ведущий экзогенный геологический процесс на берегах искусственных водоемов.

Иркутское водохранилище

В структурно-геологическом отношении водоем располагается на границе двух структур – Байкальской рифтовой зоны и платформенной части. В верхней части водохранилища берега водоема развиваются в архей-протерозойских метаморфизованных породах, представленных гнейсами, гранитогнейсами и кристаллическими сланцами, что объясняет то обстоятельство, что верхняя часть береговой линии водохранилища наиболее устойчива к размывам.

Берега основной акватории водоема формируются в осадочных породах юрского возраста – песчаниках, аргиллитах, алевролитах, конгломератах. Для юрских пород характерно формирование волноприбойных ниш, нависающих карнизов, происходит раскрытие трещин, проявление вывалов (рис. 2.6).



Рисунок 2.6. Характерные абразионные формы в береговых уступах юрских пород: *а* – крупная трещина; *б* – волноприбойные ниши.

Берега, сложенные коренными юрскими породами (угленосно-терригенная формация), подвержены абразионному размыву, динамика которого определяется скоростью выветривания горных пород и сохранностью делювиального шлейфа в пределах абразионного уступа. При размыве делювиального шлейфа, перекрывающего склон, происходит более интенсивное проникновение агентов выветривания в глубь массива. Отступление бровки склона на таких берегах фиксируется в пределах первого десятка метров. В большинстве случаев отступление бровки берега вызвано сочетанием абразионного процесса и выветривания, формированием осыпей, локальных сплывов (рис. 2.7).



Рисунок 2.7. Абразионная форма берега в юрских песчаниках (участок Гальцы).

Абразионные берега на участках правобережья водохранилища сложены суглинками и супесями пылеватыми, макропористыми, карбонатными, в приповерхностном слое лессовидными [Рященко и др., 2014]. Берега, сложенные четвертичными породами аллювиального, пролювиального и делювиального генезиса,

испытывают значительные размывы. На участке микрорайона «Солнечный» по опорным разрезам нескольких инженерно-геологических скважин были выполнены детальные исследования грунтовой толщи. Т.Г. Рященко с соавторами выделены лессовые толщи, этапы и особенности формирования и установлено, что лессовидные сепеси и суглинки четвертичного возраста высокопылеватые, агрегированные, нормально пластичны, средне-сильноуплотненные. По разрезу сверху вниз увеличивается плотность (1,94–2,02), растет сцепление (0,07–0,135), возрастает содержание органики и водорастворимых солей. В интервалах 0–3 и 8–10 м грунты просадочны. Данные минерального состава глинистой составляющей лессовых отложений показывают присутствие в образцах монтмориллонита [Рященко и др., 1992]. Химический состав глинистой фракции, содержащий монтмориллонит, способствует снижению устойчивости лессовидных отложений в абразионном уступе и их значительной размываемости водами водохранилища [Рыбченко, 2009; Рыбченко и др., 2012].

Ключевой участок Солнечный расположен по правобережью основной акватории. Характерной особенностью ветрового режима Иркутского водохранилища является значительное преобладание северо-западных и юго-восточных ветров, составляющих более половины повторяемости от всех направлений. При анализе ветрового волнения Г.И. Овчинниковым выявлено преобладание волновых воздействий на правобережье водохранилища. В мысовой части микрорайона «Солнечный» средняя максимальная высота волн составляет 0,4 м, а энергия волнения колеблется от 2,2 до 8,4 тыс. тм [Овчинников и др., 1999]. Высота берегового уступа на этом участке берега изменяется от 1,5 до 5 м (рис. 2.8). Мониторинговые работы показали ежегодное отступление бровки берега от 1,2 в юго-восточной части участка до 1,58 м/год в северо-западной части.



Рисунок 2.8. Абразионный склон на участке Солнечный: *а* – май 2004 г., *б* – осень 2004 г.

В связи с экстремальными размывами в микрорайоне «Солнечный» берег укреплен на участке от ледокола «Ангара» до пристани «Ракета».

На ключевом участке Ново-Разводная берег сложен супесями, суглинками лессовидными. Сформировавшийся береговой уступ вертикальный, высота 2–4 м. Ежегодное отступление бровки фиксируется в пределах до 3 м (рис. 2.9).

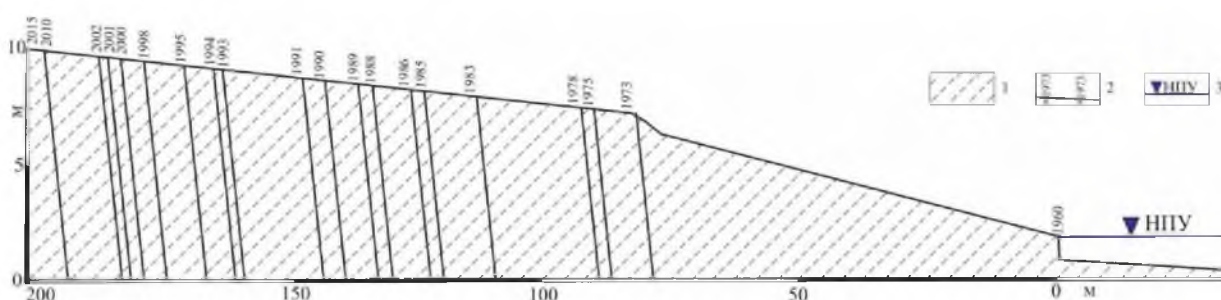


Рисунок 2.9. Профиль берега с абразионным размывом на участке Ново-Разводная.

1 – супесь пылеватая; 2 – зафиксированное отступление бровки склона по годам; 3 – нормальный подпорный уровень.

Внутригодовая активность абразионного процесса на ключевых участках даже с близким геологическим строением берега значительно различается и зависит от локальных литологических особенностей строения разреза и ветроволновых нагрузок на склон. Плановое положение участков влияет на скорость абразионного процесса.

Максимальной трансформации подвержены мысовые участки, сложенные четвертичными отложениями (суглинки и супеси).

Братское водохранилище

Братское водохранилище является самым крупным водоемом в каскаде, с самыми значительными показателями колебания уровня воды как в сезонном, так и в многолетнем регулировании, что позволяет рассматривать водоем как натурную модель при исследовании геологической среды крупных природно-технических объектов.

Активное проявление процесса абразии в пределах Братского водохранилища в совокупности с проявлением различных экзогенных геологических процессов предопределяет разнообразие механизмов трансформации берега и формирования генетических подтипов берегов: абразионно-осыпные, абразионно-обвальные, абразионно-оползневые, абразионно-карстовые и др. (Овчинников, 2003).

В пределах локального участка *Быково* были проведены исследования по выявлению закономерностей развития и взаимосвязей экзогенных геологических процессов в пределах берегового склона с учетом колебания уровня. Участок Быково – это оползневой склон северо-восточной экспозиции протяженностью 250–300 м. Береговая зона сложена породами гипсово-соленосно-карбонатной формации нижнего – среднего кембрия $\epsilon_{1-2}lt$, состоящими из доломитов, известняков, гипсов, ангидритов и карбонатных брекчий, обнажающихся в береговом уступе в южной и северной части участка. Обнажены также отложения осинской пачки верхоленской свиты среднего-верхнего кембрия $\epsilon_{2-3}v1_1^1$, представляющие собой переслаивающиеся мергели и доломиты с редкими прослоями аргиллитов и алевролитов, маломощными пропластками и линзами гипса. В нижней части свита содержит глины с брекчиями красной и зеленой окраски (рис. 2.10).

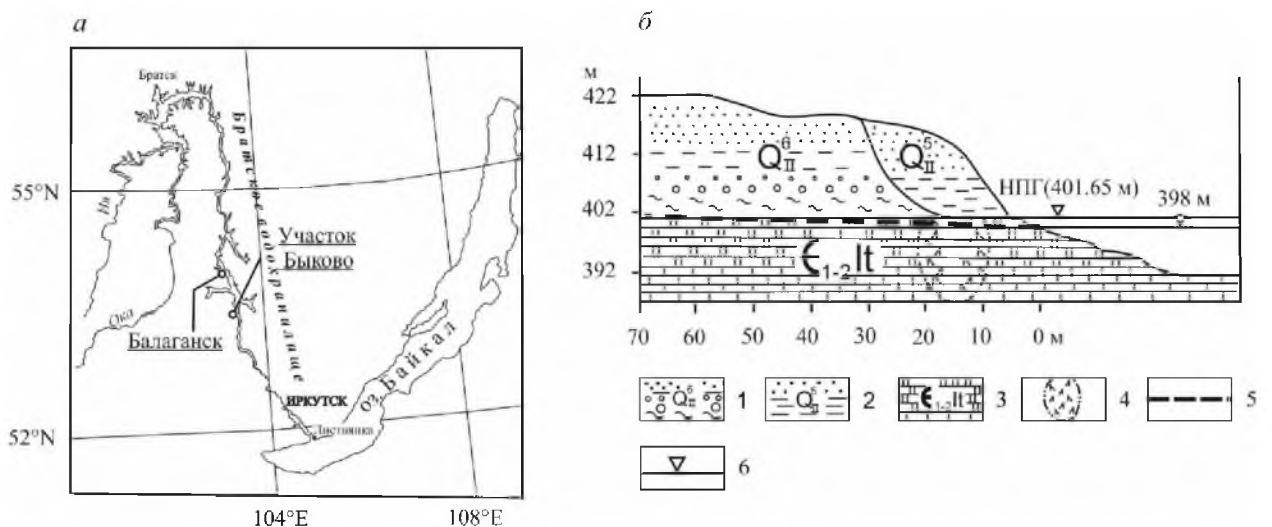


Рисунок 2.10. Исследуемый участок Быково: *a* – схема месторасположения; *b* – геологический разрез.

1 – среднечетвертичные аллювиальные отложения шестой террасы: суглинки и глины темно-серые, коричнево-бурые и бурые с прослоями песков; 2 – среднечетвертичные аллювиальные отложения пятой террасы: преимущественно мелкие и тонкозернистые пески с мелким галечниковым материалом, в верхней части развиты супеси и суглинки; 3 – породы гипсово-соленосно-карбонатной формации нижне-среднего кембрия $\text{Є}_{1-2\text{т}}$: доломиты, известняки, гипсы, ангидриты и карбонатные брекчии; 4 – предполагаемые карстовые полости, заполненные рыхлым обломочным материалом; 5 – уровень грунтовых вод; 6 – нормальный подпорный горизонт (НПГ).

Абразионно-оползневой подтип берега развивается в среднечетвертичных породах (аQп) фрагмента эрозионно-аккумулятивной террасы, представленных песком, песком с галькой, супесями и суглинками. Наполнение водоема привело к колебанию уровня подземных вод, обводнению песков, дополнительному переувлажнению суглинков и глин, в результате чего склон деформировался при смещении грунта по оползневой круглоцилиндрической поверхности. На склоне проявляются оползни-сдвиги и оползни-сплывы. На выбранном ключевом участке развиваются одновременно абразия, оползни и эрозия; кроме того, в массиве на уровне зоны аэрации имеет место развитие карстового процесса. Положение уровня воды и развитие абразионной активности регулирует сохранность оползневых масс на склоне, смещенного материала в пределах уступа и на отмели. Абразия подводного склона и берегового уступа при высоком положении уровня воды вызывает нарушение профиля равновесия и провоцирует новые оползневые смещения на склоне. В результате абразионной деятельности происходит подрезка устьев оврагов, выходящих на прибрежную отмель, что способствует активизации эрозии и приводит к увеличению объемов эрозионных форм, деформированию склона в теле оползня.

Интенсивное развитие экзогенных процессов на побережье участка обусловлено литологическим строением массива. Грунты, слагающие склон, имеют скелетно-агрегированную микроструктуру и мелко- и крупнопылеватый элементарный тип структурной модели. Супеси и суглинки высокопористые, их межструктурные связи обеспечиваются водорастворимыми солями (0,4–0,5 %) и повышенным содержанием карбонатов (34–66 %). Для суглинка из зоны скольжения характерны дисперсный состав и высокая степень агрегированности глинистой фракции. Структура грунта представлена преимущественно тонко- и мелкопесчаными частицами и агрегатами, которые обладают меньшим сцеплением и более низкими прочностными показателями [Козырева и др., 2008; Мазаева и др., 2011].

На ключевом участке проводилась топографическая съемка с построением объемных картографических моделей (рис. 2.11). Наложение объемных ситуационных геодинамических моделей позволило на каждом из этапов исследований зафиксировать изменения состояния геологической среды, получить точные количественные данные произошедших изменений.

Отступление подножья берегового уступа под действием абразии в период высокого стояния уровня воды в водохранилище (2001–2002 гг.) на участке достигло 10 м. Размывы не зафиксированы на тех отрезках участка, где отмечается выход коренных пород. Коренные карстующиеся породы под прямым абразионным воздействием интенсивно выщелачиваются, формируя карстовые полости, ниши и нависающие карнизы. В местах обнажения сульфатно-карбонатных пород на береговом склоне отмечены уходящие в массив трещины, трещиноватые зоны.

В 2003 году (низкое положение уровня воды – в июле ср. мес. 394,84 м) на участке наблюдалась активизация эрозионных процессов и относительная стабилизация оползневых деформаций. Ширина оврага увеличилась с 6 до 19 м. В пределах отмели четко выражены два вторичных абразионных уступа: первый высотой от 0,5 до 1,5 м, второй – 0,35–0,39 м.

В 2004 году отмечена активизация оползневых процессов, по своим размерам превысившая активизацию овражной эрозии. В северной части участка находится оползневой цирк шириной 22 м с тремя четко выраженными оползневыми ступенями. Свежая стенка срыва имеет высоту 3,5 м, угол наклона зоны скольжения 46° . Сошедшие массы грунта практически полностью перекрыли среднюю и устьевую часть оврага, который превратился в узкую «шнурковую» промоину, а в центральной части склона, как по «лотку», сошел оползень-поток с ярко выраженной стенкой срыва и обнаженными в некоторых местах зонами скольжения. Оползневой «язык» спустился на пляж, к урезу воды. Склон интенсивно увлажнен и отмечается рассредоточенный выход подземных вод. В южной части на протяжении 50 м склон деформирован свежим оползневым цирком с сохранившимися элементами ранее сошедших оползневых ступеней. Видимая высота стенки срыва 3,5 – 4,0 м, в некоторых местах стенка перекрыта осypью вышележащего аллювиального песка. Оползневые массы вспахали береговой пляж. Оползневыми деформациями затронуто более половины (52 %) общей протяженности участка. В 2005 году при высоком положении уровня в водоеме произошло затопление оползневых масс и размыв вторичных абразионных уступов, ранее сформированных на пляже. Зафиксированное отступление подножья берегового уступа неравномерно – от 1 до 5 м в год.

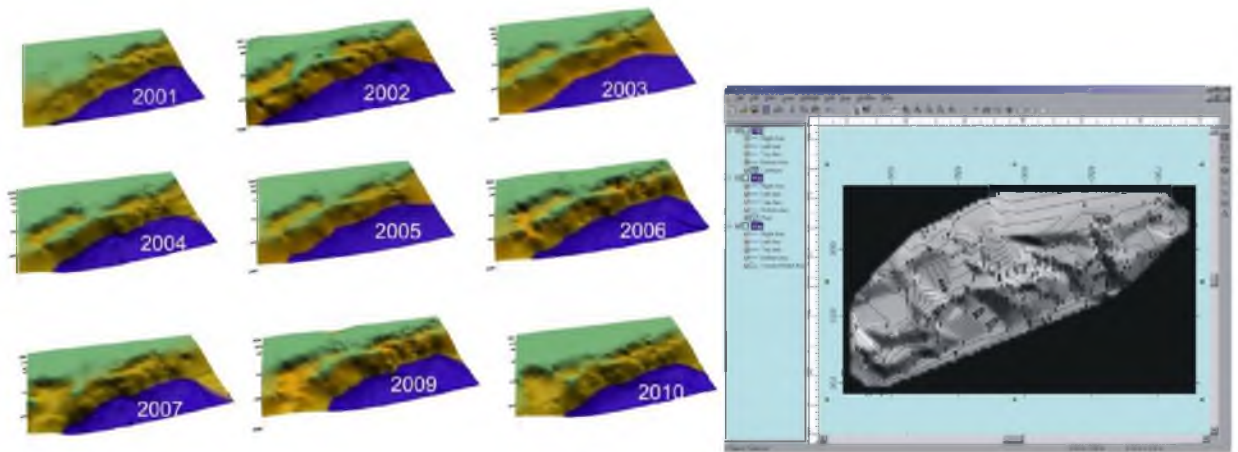


Рисунок 2.11. Динамика экзогенных процессов по результатам сопоставления экзогеодинамических моделей участка Быково 2001–2010 гг.

В результате взаимодействия экзогенных геологических процессов в пределах исследуемого участка побережья формируются определенные подтипы береговых склонов – абразионно-оползневой, абразионный с интенсивным развитием эрозионных форм и абразионно-карстовый. Развитие каждого подтипа берега и доминанта его экзогенных составляющих различны во времени и в большей степени определяются режимом эксплуатации водохранилища.

Участок Загорюково расположен на восточном побережье Братского водохранилища. За период исследований на данном ключевом участке определено развитие абразионно-эрозионного подтипа берега. Годовой прирост вершины оврага в период низкого положения уровня воды в водохранилище составил 2,89 м (слияние вершины оврага с просадочной воронкой). Механизм приращения вершины оврага – эрозионно-суффозионно-просадочный. Линейное продвижение другой вершины суффозионно-просадочной воронки в ложбине стока оврага в результате линейной эрозии за это же время составило 0,39 м. Отступление бровки склона за период наблюдений достигло 2,7 м.

Анализ фактических данных о развитии экзогенных процессов в пределах ключевых участков, а также построение объемных экзогеодинамических моделей позволили выявить особенности развития и динамику оползневой, эрозионной процессов, воздействия абразии на береговой уступ (рис. 2.12). Рассмотрены и проанализированы процессообразующие факторы, учтены изменяющиеся параметры – количество осадков, температура воздуха, ветровые нагрузки на береговой склон и колебание уровня воды в водоеме.

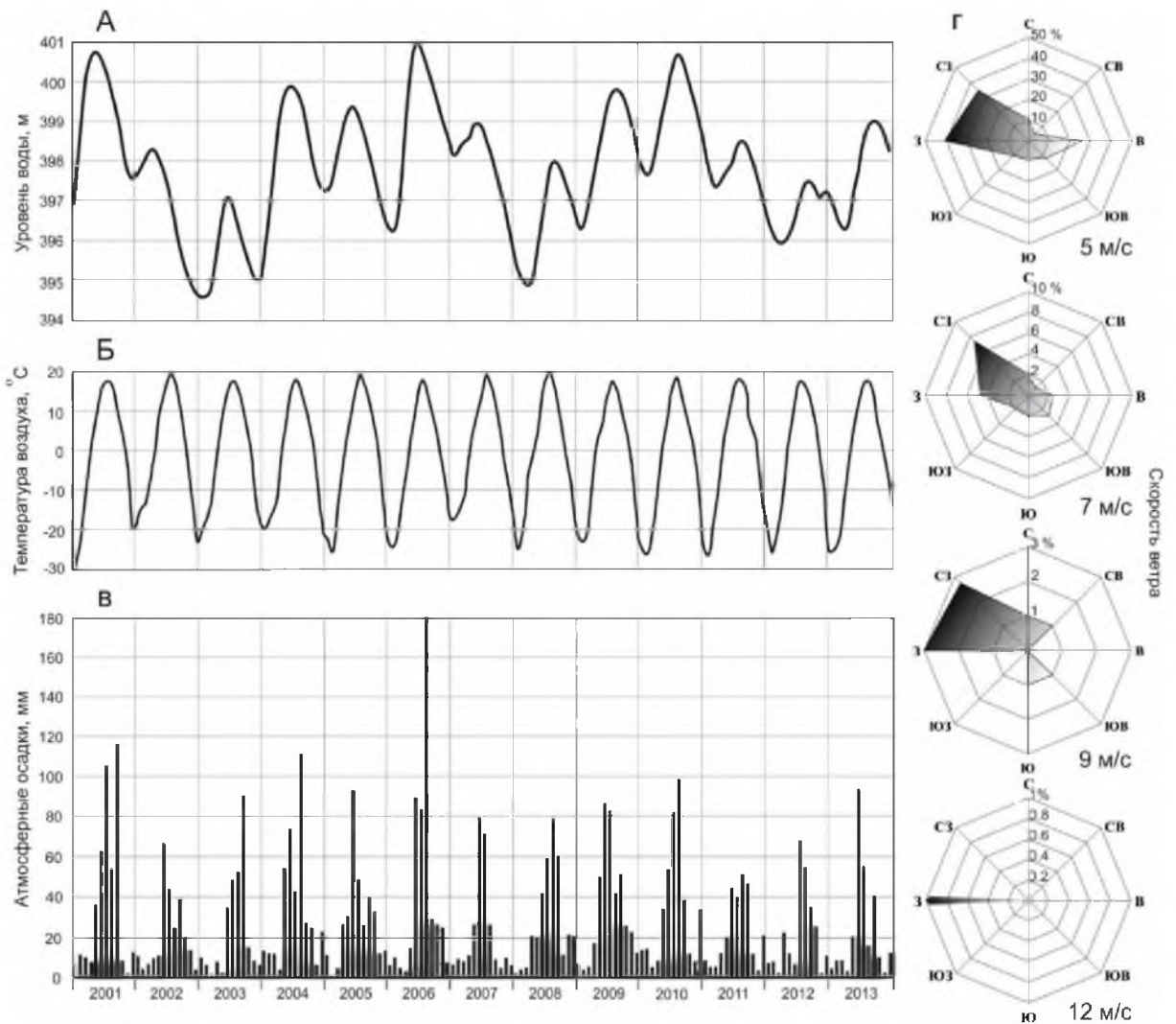


Рисунок 2.12. Изменение метеорологических условий и колебание уровня воды в период с 2000 по 2013 г., Балаганская метеостанция (источник: Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации, World Data Center, <http://www.meteo.ru/>).

А – колебание уровня воды в водохранилище; *Б* – средняя месячная температура воздуха; *В* – среднее месячное количество осадков; *Г* – преобладающие ветры.

Уровеньный режим Братского водохранилища за анализируемый период представлял собой чередующиеся этапы высокого и низкого уровня воды в водоеме (рис. 2.12, А). После двух лет высокого положения воды в водохранилище (2001, 2002 гг.) наблюдалось снижение уровня с января 2002 по июль 2003 г. (с повышением в летний период) на 4,81 м. 2003 г. характеризовался низким положением уровня. Кривая уровня воды в водохранилище 2004 г. в точности повторяла положение кривой 2001 г., и уровень был достаточно высоким. С апреля по октябрь уровень поднялся на 4,93 м (0,98 м в месяц). В 2004–2006 гг. – высокое положение уровня, и в 2007 г. произошло его понижение. 2008 год характеризовался низким положением уровня воды в водоеме.

Следующий этап повышения уровня 2009 и 2010 г. привел к положению высоких уровней водохранилища. Прямой зависимости между среднемесячным количеством осадков и положением уровня воды в водоеме не прослеживается, технически регулируемый водоем выдерживает заданные эксплуатационные параметры. Сопоставление и анализ положения уровней водохранилища и смены состояний на ключевом участке исследований по геодинамическим моделям показали, что прослеживается ответная реакция геологической среды на смену положения уровня через динамику экзогенных процессов. Положение уровня характеризуется определенной цикличностью; в свою очередь, динамика процессов также тяготеет к определенной цикличности. Значительная активизация развития комплекса береговых процессов (формирование абразионно-оползневого подтипа берега) зафиксирована в 2001, 2004, 2006 и 2010 годах. В другие годы деформации склона в результате активизации экзогенных процессов либо были слабее, либо сохранились в прежних пределах. Из-за смены положения уровня не наблюдается стабилизации береговых процессов, лишь относительная стабилизация наступает на определенный промежуток времени, на год или сезон, до следующей смены положения уровня в водохранилище. Основным критерием для анализа динамики процессов, прогнозных построений развития локальных участков берега, с учетом взаимодействия группы экзогенных процессов, генетического подтипа берега, можно считать уровенный режим водохранилища.

Проведенное детальное изучение состояния геологической среды берегового склона водохранилища на локальном уровне показало следующее:

– Взаимодействие экзогенных геологических процессов внутри локального берегового участка происходит постоянно, выражаясь в последовательной смене ведущего экзогенного процесса, т.е. в формировании абразионного типа и абразионного подтипов берега. В отдельные сезоны года в зависимости от природно-климатических и техногенных факторов интенсивность одного процесса может преобладать. При изменении параметров процессообразующих факторов в геологической среде происходит смена ведущего процесса.

– Оползневые и эрозионные процессы в пределах локальной береговой геосистемы являются антагонистами, проявляясь последовательно, но их совместное с абразией развитие приводит к увеличению скорости преобразования берегового склона.

– Динамика оползней на водохранилищах при прочих равных условиях (геология, геоморфология) определяется интенсивностью развития абразионного процесса, служащего причиной снижения устойчивости склона.

– Уровненный режим регулирует сохранность или размыв подводной либо надводной части берегового склона.

– Нарастающая во времени абразионная активность выражается в поступательном воздействии на береговой склон – переформировании подводной части склона, что приводит к изменению параметров аккумулятивной террасы (размыв берегового уступа), отступанию бровки склона в глубь массива.

– Активность абразионного процесса в пределах берегового склона с различной интенсивностью в сезоне зависит от ветроволновой нагрузки.

На основе полученных результатов по динамике экзогенных геологических процессов предлагаются два варианта развития берегового склона с учетом положения уровня:

а) повышение уровня и/или высокое положение; б) понижение уровня и/или низкое положение воды в водохранилище.

В результате анализа факторов, среды и динамики процессов составлена модель развития экзогенных геологических процессов при формировании берегового склона водохранилища в условиях эксплуатации водоема, колебаний уровня воды. Представленная модель отражает последовательность взаимодействий процессов на локальном участке берега при смене положений уровня воды в водохранилище.

Анализ развития берегового склона, выявление закономерностей и взаимосвязей экзогенных процессов могут служить аналоговой моделью развития берегового склона в подобных инженерно-геологических условиях на региональном уровне. Существует возможность применения результатов при прогнозе развития береговых склонов с учетом положения уровня воды в водоеме.

Модели развития берегового склона водохранилищ

1-я модель

При высоких уровнях водохранилища происходит абразионное разрушение береговых уступов осушенной части склона, формирование волноприбойных ниш в коренных породах, отступление подножий, что снижает общую устойчивость крутых склонов. Дополнительное увлажнение грунтов под воздействием как климатического фактора (обильные осадки), так и гидродинамического (заплески и повышение уровня грунтовых вод вслед за повышением уровня воды в водоеме) приводит к изменению прочностных показателей пород. При засушливом периоде грунты, слагающие склон и обладающие высокой степенью объемной усадки, могут испытывать растрескивание, расслаивание и нарушение монолитности породы. Все эти физико-механические процессы, сопровождающие процесс выветривания, нарушают прочность массива и его

устойчивость при размыве «высокой» водой. Результирующим становится развитие оползневых процессов, которое проявляется в виде зарождения трещин отпора, формирования свежих оползневых цирков, обновления «старых» оползней и смещения береговой бровки в глубь склона (рис. 2.13). Наблюдается активная динамика береговых процессов в осушенной части берегового склона.

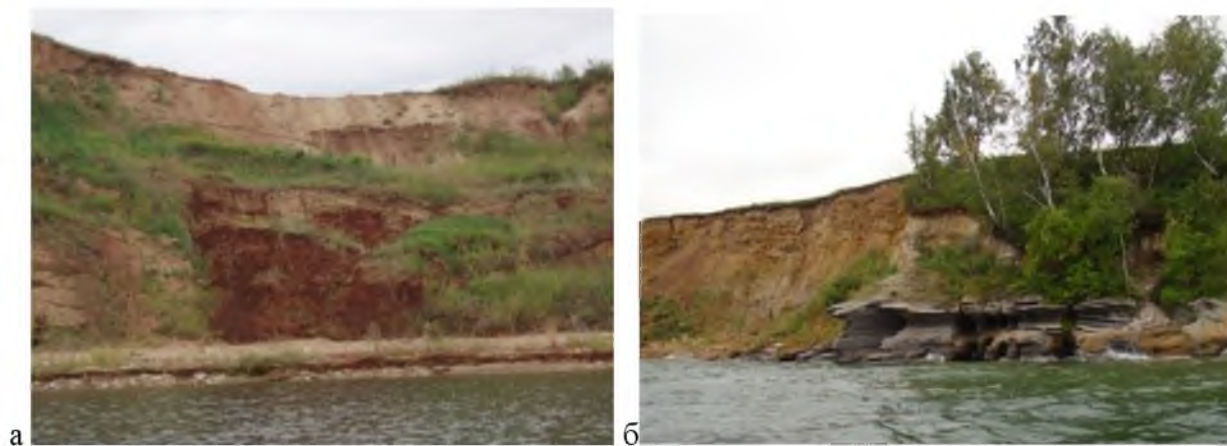


Рисунок 2.13. Береговые склоны в период высокого положения уровня водохранилища: *а* – свежий оползневой цирк; *б* – волноприбойные ниши, размыв основания абразионного уступа.

Активные проявления оползневых процессов вызывают значительные изменения морфологии берегового склона, что закономерно отражается на развитии сопутствующих эрозионных процессов. Формирование оползневых сплывов и оползней-потоков на бортах оврагов приводит к увеличению их ширины и уменьшению глубины, перекрытию устьевых частей отдельных эрозионных форм.

2-я модель

При низких уровнях отмечается активизация эрозионных процессов в осушенной части берегового склона при относительной стабилизации общих деформаций склона. После абразионной подрезки берегового склона с находящимися в его пределах устьевыми частями оврагов происходит нарушение профиля продольного равновесия оврагов и активизация глубинной эрозии. Возрастает энергия эрозионного потока, прорезающего береговой уступ, в результате чего на отмель выносятся большое количество грунтового материала, формирующего конусы выноса. Снижение уровня воды в водохранилище, а вслед за ним и уровня грунтовых вод приводит к усилению фильтрационных потоков в береговом массиве и закономерной активизации суффозионно-просадочных процессов, что также способствует вершинному росту эрозионных форм [Мазаева и др., 2012]. При постепенно понижающемся уровне воды на отмели образуются вторичные абразионные уступы, которые также как и конусы выноса,

прорезаются эрозионными промоинами (рис. 2.14). Абразионная деятельность смещается в обводненную часть склона, приводя к переформированию подводной аккумулятивной террасы.



Рисунок 2.14. Береговые склоны в период низкого положения уровня водохранилища: *а* – широкий пляж; *б* – эрозионные промоины в пределах вторичного абразионного уступа на осушенном пляже.

Усть-Илимское водохранилище

Берега Усть-Илимского водохранилища большей частью формируются в скальных и полускальных породах (76 %). Абразионный размыв на берегах данного водоема незначителен по причине особого геологического строения побережья, устойчивого к процессам абразии и понижения уровня воды в водохранилище в годовом цикле в наиболее штормовые периоды [Тржцинский и др., 2005].

Оползни

Оползни развиваются на локальных участках побережья водохранилищ. Генетически большинство оползней на берегах ангарских водохранилищ относится к группе оползней выдавливания блочного типа [Тржцинский, 1969; Демьянович, 1976]. Важным и необходимым условием возникновения и развития таких оползней является двухслойное строение склонов, при котором глинистые отложения, предрасположенные к пластическим деформациям, залегают стратиграфически ниже непластичных горных пород. Перекрывающие горные породы играют роль инертной давящей массы, а глинистые породы являются активной частью оползня. В последних, по мере постепенного разуплотнения и разупрочнения пород в результате воздействия вод водохранилища, возникают деформации, проявляющиеся сначала в виде медленных пластичных течений, а завершающиеся в стадии сдвига.

На Иркутском водохранилище оползни развиты в меньшей степени, поскольку большинство крупных оползневых тел в юрских песчаниках оказалось затоплено. Большое количество оползневых унаследованных участков расположены на берегах Братского водохранилища. Унаследованные оползневые участки – это те участки, где деформации склонов начались задолго до создания водохранилища (в конце плейстоцена, при формировании среднего комплекса террас р. Ангары) и возобновили/сохранили активность после наполнения водоемов, т.е. после повышения базиса эрозии, и где в настоящее время отмечается определенная динамика в развитии оползневых смещений.

Ново-Октябрьский участок на Братском водохранилище после наполнения водохранилища сохранил деформации глубинной ползучести. На этом участке средняя скорость смещений составляет 7,17 мм/год. Отмечается незначительное увеличение оползневых рвов и обновление суффозионных воронок, увеличение ширины которых происходит со скоростью до 1,5 см/год. Ключевой участок имеет северо-восточное простирание, расположен в узкой части Окинской акватории, для ветров основных направлений он расположен с подветренной стороны. Средняя скорость отступления бровки берегового уступа на протяжении всего участка составляет 22,7 см/год (анализ фондовых материалов лаборатории инженерной геологии и геоэкологии ИЗК СО РАН, 1980–1995 гг.). Разрушение берегового уступа происходит в результате доминирующего воздействия процессов выветривания.

По замерам на реперах, выполненных Ю.Б. Тржцинским в 60-е годы, средняя скорость движения оползней глубинной ползучести в естественных условиях составляла 0,5–0,4 мм/год (период до наполнения водохранилища). Анализ динамики движений оползня в коренных породах на севере водоема (ключевой участок *Монастырский оползень*) говорит о том, что на этапе эксплуатации все элементы оползневого склона движутся целиком, стабильно и с определенной скоростью – от 1,7 до 3,0 см/год (анализируемый период с 1977 по 1995 г.). Блочные оползни выдавливания сохраняют скорости, не превышающие максимально нескольких сантиметров в год, однако стадии активности процесса смещений носят действительно «вековой» характер. Скорость смещений на участках развития унаследованных блочных оползней в условиях эксплуатации водохранилища увеличилась в разы. Деформации на закартированных и периодически наблюдаемых участках имеют медленные, но стабильно выдержанные по времени смещения – «глубинной ползучести» (по определению Г.Б. Пальшина).

Причинами развития подобных медленных деформаций зачастую служат процессы дезинтеграции горных пород основания массива, изменения их физико-механических свойств. Все оползневые участки южной части Братского водохранилища, где

распространены сульфатно-карбонатные породы, испытывают последствия процессов выщелачивания. Во всех случаях в геологическом разрезе склона отмечается наличие прослоев гипсоангидритовых пород со следами растворения.

В районе *залива Шалоты* находится несколько участков наблюдения за развитием оползней. В верхней части разреза оползневых склонов, на уровне современного нормального подпорного уровня (НПУ) водохранилища, находится слой выщелоченных сульфатно-карбонатных пород, внутри которого и расположена предполагаемая область смещений. Обследование оползневого участка Шалоты, картирование оползневых форм и анализ мониторинговых данных свидетельствуют об активном протекании процессов трансформации склона: раскрытии оползневых рвов, заложении свежей трещинно-просадочной зоны. Рост параметров оползневых форм на участке указывает на активность развития оползневого процесса, скорость выщелачивания и развития смещений. Переменное обводнение и осушение горных пород в зоне аэрации приводят к физико-химическим и физико-механическим изменениям: коренные доломиты в процессе выщелачивания переходят в доломитовую муку с потерей целостности и далее в пластичную глину. Доломитовая мука обладает низкой механической прочностью, а при обводнении переходит в текучее состояние, формируя зону оползневых смещений. На урезе водохранилища (на глубине 10–11 м от поверхности склона) вскрыт прослой доломитовой муки мощностью до 0,5 м, в пределах которого и происходят пластические деформации, приводящие к смещению блоков вышележащих пород.

На *участке Шалоты* мониторинговые работы проводились с 2002 года. Ежегодные измерения по профилям зафиксировали смещения оползневых ступеней в сторону водохранилища. На склоне по трещиноватым зонам происходит проседание дневной поверхности фронтальных блоков участка, вертикальные смещения достигают 35 см. На отдельных отрезках оползневого склона зафиксировано проявление серии провалов с нарушением целостности дернового покрова, характеризующих заложение границы нового оползневого блока. Провалы на поверхности достигали размеров 40×40 см со значительной видимой глубиной более 3 м. При высоких уровнях воды в водохранилище на участке происходит абразионный размыв склона и делювиальных образований, скопившихся у подножья абразионного уступа. Высота осушенного абразионного уступа составляет 3,75 м. По результатам наблюдений за 2002–2009 гг. подножье абразионного уступа отступило на 2,84 м. Бровка абразионного уступа осталась в прежних пределах, но на склоне образовались трещины, заколы, увеличилось раскрытие трещиноватых зон (рис. 2.15).

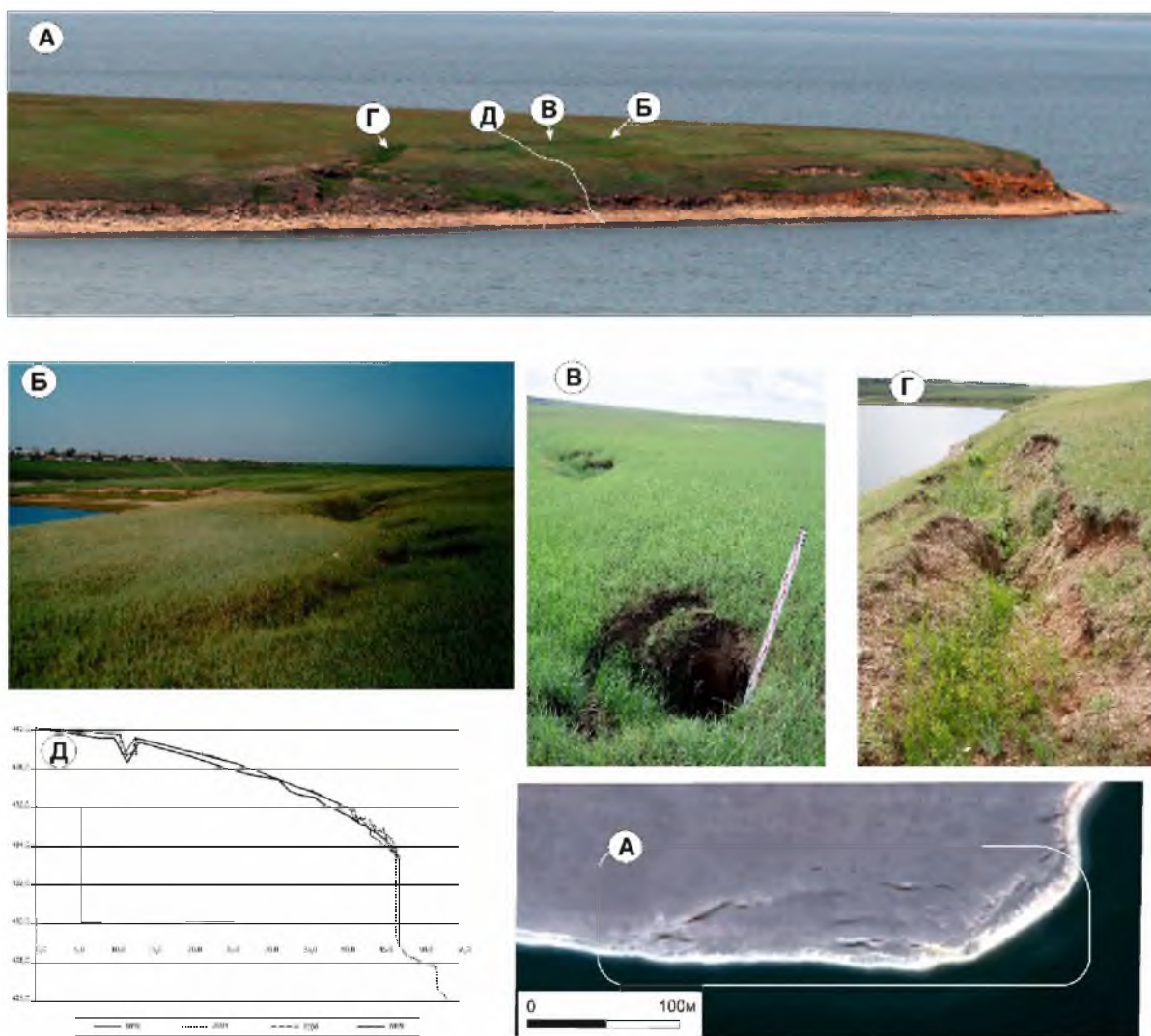


Рисунок 2.15. Оползневой склон на мысе Шалоты (А);

Б – зона просадки; В – цепочка провалов; Г – оползневой ров; Д – профиль склона по годам; НПУ – нормальный подпорный уровень (макс. – 401,68; мин. – 391,91 м).

Динамика развития оползневых процессов на участках распространения сульфатно-карбонатных пород, помимо прямого воздействия абразионного процесса на береговой склон, во многом предопределяется скоростью выщелачивания карбонатных пород в зоне плоскости смещения. Динамика оползневых деформаций на участке неравномерна по годам и зависит от динамики формирования зоны выщелачивания с глинистым составом отложений, влиянием уровенного режима водоема во взаимосвязи с карстовым процессом.

Другая генетическая группа оползней объединяет оползни со смещениями горных пород в виде сдвиговых деформаций по наклонной поверхности. Такие оползни могут произойти мгновенно, катастрофически быстро, приводя в движение значительные объемы грунта, и в такие смещения могут быть втянуты значительные по объему массы горных пород. При избыточном переувлажнении могут формироваться неглубокие,

поверхностные оползни в рыхлых отложениях: оползни-осовы, оползни-сплывы [Тржцинский и др., 2003 2005]. На левом берегу балаганского расширения в 1993 г. на крутом (до 46°), задернованном и залесенном склоне, сформировался свежий оползень (рис. 2.16).

Балаганский оползневой участок сложен отложениями красноцветной терригенной формации верхоленской свиты кембрия, представляющей на современном этапе развития геологической среды зону выветривания – «обломочную подзону» (по Г.С. Золотареву). На двухкилометровом протяжении берега отмечается несколько оползневых цирков. Самый внушительный по размерам и объему втянутых в движение масс грунта оползень находится в средней части склона протяженностью 350 м. Глубина захвата склона – до 100 м, высота 25–30 м. Верхняя стенка срыва выражена хорошо, высота обнаженной части 8–10 м. Оползневое тело представляет собой три оползневые ступени, шириной от 18 до 32 м (сразу после формирования). Верхняя ступень, высотой 15–25 м, имеет хорошо выраженную бровку и уступ. В тыльной части ступени находится оползневой ров ящикообразной формы. Глубина рва составляет 1,0–1,2 м, протяженность – до 20 м, ширина – до 1,5 м. Ниже основной оползневой ступени отмечаются еще две ступени высотой 10 и 6 м. На стенке срыва появляются и в течение года разрушаются мелкие ступени шириной 1,5–2,0, длиной до 10 м. Подножье стенки срыва перекрыто осыпью, представляющей собой красноцветную дресвяную массу выветрелых отложений (рис. 2.16, Б).

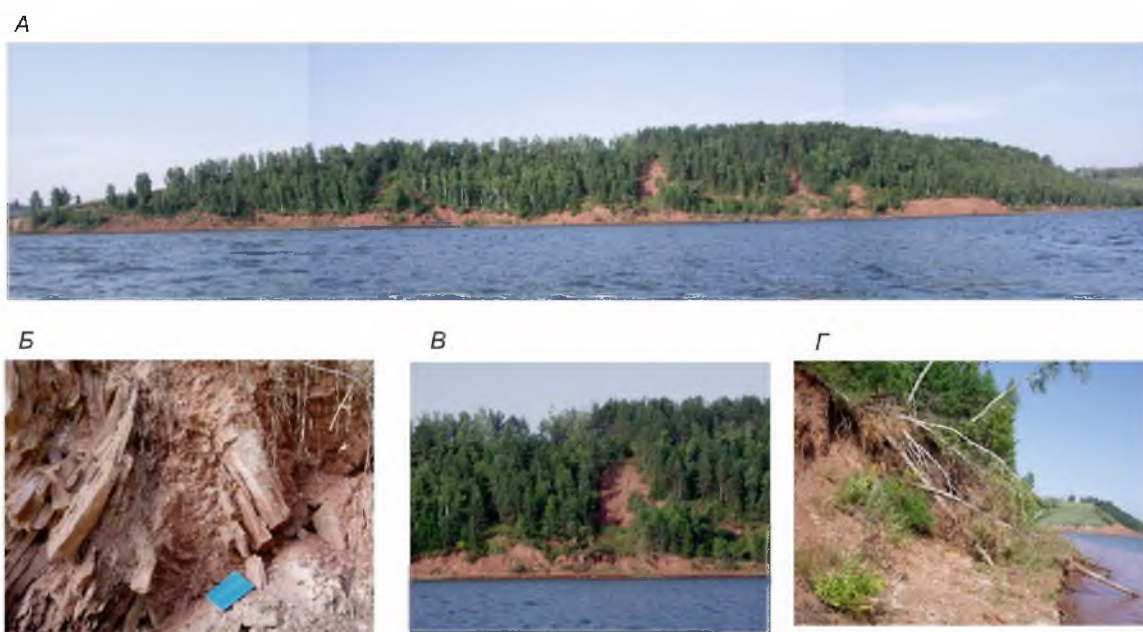


Рисунок 2.16. Балаганский оползень. *A* – панорамный вид участка; *Б* – сильновыветрелые породы верхоленской свиты кембрия; *В* – стенка срыва центральной оползневой ступени; *Г* – узкий пляж, размыв оползневых масс, формирование вторичного абразионного уступа.

Ширина водохранилища в районе участка составляет 5,5 км. К береговому склону подходят волнения разных румбов (ЮЗ и З; С и СВ), но преобладают ветры северо-западного направления (66 %) в период открытой воды (по материалам Г.И. Овчинникова, участок Балаганск). Участок Балаганского оползня практически прямолинеен, волны господствующих волнений подходят к участку почти под прямым углом. При подходе волн к берегу под углом, близким к 90° , над отмелью образуются вдольбереговые течения и противотечения, обратные фронту волны [Овчинников, Карнаухова, 1985], что способствует интенсивному абразионному размыву и разрушению оползневых форм. С 1996 года у оползня почти полностью разрушена первая ступень, остались лишь ее фрагменты (максимальная высота 4 м).

Существенным фактором в подготовке горных пород на береговом склоне к формированию деформаций является процесс выветривания горных пород. В зачистке стенки срыва Балаганского оползня хорошо видна трещиноватость аргиллитов и алевролитов, слагающих склон. Все породы зоны выветривания превращены в щебенисто-глинистые образования. В условиях существования водохранилища с нестационарным уровенным режимом и с частым чередованием падения и подъема уровня на несколько метров происходит разупрочнение глинистых пород в зонах переменного водонасыщения. С одной стороны, при обводнении массива вода способна адсорбироваться на поверхности глинистых пород, растворять химически неустойчивые соединения, способствовать ионному обмену, или, другими словами, ускорять процессы химического выветривания. С другой стороны, вода действует как расклинивающая сила, способствующая разъединению прослоек аргиллитов на плитчатые агрегаты. В дальнейшем плитчатые отдельности под действием воды претерпевают качественные изменения, превращаясь из массивных твердых пород в пластичные глины и суглинки. Происходит полное разрушение цементирующего вещества, вода проникает в кристаллизационные решетки, нарушая связи между глинистыми и пылеватыми частицами, формируются коллоидные связи между ними. Грунт приобретает способность к смещению [Демьянович, 1976; Рященко, Данилова, 1985; Рященко и др., 2014]. Смещение таких оползней (как вновь сформировавшийся Балаганский и унаследованные Барсунский и Имбейский) происходит по наклонной поверхности скольжения, которая формируется в зоне разупрочненных глинистых пород (аргиллитов и алевролитов).

Оползневые процессы, развивающиеся на берегах ангарских водохранилищ, во многом предопределены литологическими особенностями локальных участков, положением уровня воды в водохранилище, абразионными нагрузками на склон. В

зависимости от типа оползневых смещений, каждому оползневому телу присуща определенная динамика процесса во времени. На современном этапе эксплуатации водохранилищ на береговых склонах зафиксированы локальные оползневые участки с общей протяженностью деформаций: на Братском водохранилище 4,3 км (менее 0,1 % от общей протяженности береговой линии Братского водохранилища), на Иркутском – 530 м (около 0,1% от общей протяженности береговой линии Иркутского водохранилища). В пределах Иркутского и Братского водохранилищ оползневыми деформациями затронута площадь 0,62 км² (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Площадная характеристика оползней Братского и Иркутского водохранилищ

Название оползневого участка	Протяженность вдоль берега (м)	Ширина захвата склона (м)	Площадь, пораженная процессом (м ²)	Категория земель
Братское водохранилище				
Балаганский	370–400	120	44400–48000	Сельскохозяйственного назначения
Монастырский	480	100	48000	Земли лесного фонда
Казачинский	700	160	112000	Земли лесного фонда
Стрелкинский	600	50–250	30000–150000	Земли лесного фонда
Имбейский	120–200	50–60	6000–12000	Земли лесного фонда
Барсунский	150–170	50–70	7500–11900	Земли лесного фонда
Шалоты	250	50	12500	Земли лесного фонда
Быково	250	50	12500	Земли лесного фонда
Тынькобский	100	120	12000	Земли лесного фонда
Ново-Октябрьский	250	82–120	20500–30000	Земли лесного фонда
В коренных породах	100	60	6000	Земли лесного фонда
Участок №7	40–50	30	1200–1500	Земли лесного фонда
В рыхлых породах	60	30	1800	Земли лесного фонда
Силотский	300	120	36000	Земли лесного фонда
Другие участки	100–400	50–200	80000	Земли лесного фонда
		Площадь, пораженная оползневыми деформациями 574200 м ² – 0,57 км ²		
Иркутское водохранилище				
Ершовский	250	100	25000	Городские территории
Другие участки	280	100	28000	Земли лесного фонда
		Площадь пораженная оползневыми деформациями 53000 м ² – 0,053 км ²		

Карст

Карстовый процесс в зоне влияния искусственных водоемов имеет природно-техногенный характер. Развитие природного карста обусловлено наличием карбонатных и сульфатных пород кембрия (доломиты, известняки, карбонатные брекчии, ангидриты,

гипсы), терригенно-карбонатных пород ордовика (доломиты, известняки, известковистые и доломитовые песчаники) и карбонатных пород протерозоя (мрамора, мраморизованные известняки) и циркулирующих в них трещинно-пластовых и трещинно-карстовых вод [Тржцинский, 1996]. В зоне влияния водохранилищ выделен карбонатный, сульфатный и сульфатно-карбонатный тип карста [Овчинников и др. , 1999], наиболее динамичен в современных условиях эксплуатации водохранилищ сульфатный карст юга Братского водохранилища [Козырева, 2003].

Типичный геологический разрез карстового района юга Братского водохранилища, включающий гипсоносные породы, имеет следующий вид: сверху залегает пласт прочного доломита мощностью 10–12 м, изобилующий кавернами и рассеянный густой сетью трещин. Ниже следует гипсоангидритовая порода с пропластками доломитов. В ней на глубине 30–35 м подсечен выдержанный пласт сильно загипсованных доломитов мощностью до 6 м. Гипсоангидритовые породы подстилают массивные доломиты. На контакте сульфатно-карбонатных пород с доломитами отмечены процессы выщелачивания. Здесь происходило образование карстовых полостей, которые позднее были заполнены доломитовой мукой либо глинистым материалом (рис. 2.17). К контакту гипсоангидритовых пород с известняками и загипсованными доломитами приурочены основные проявления карстовых форм и другие деформации, проявляющиеся на земной поверхности.

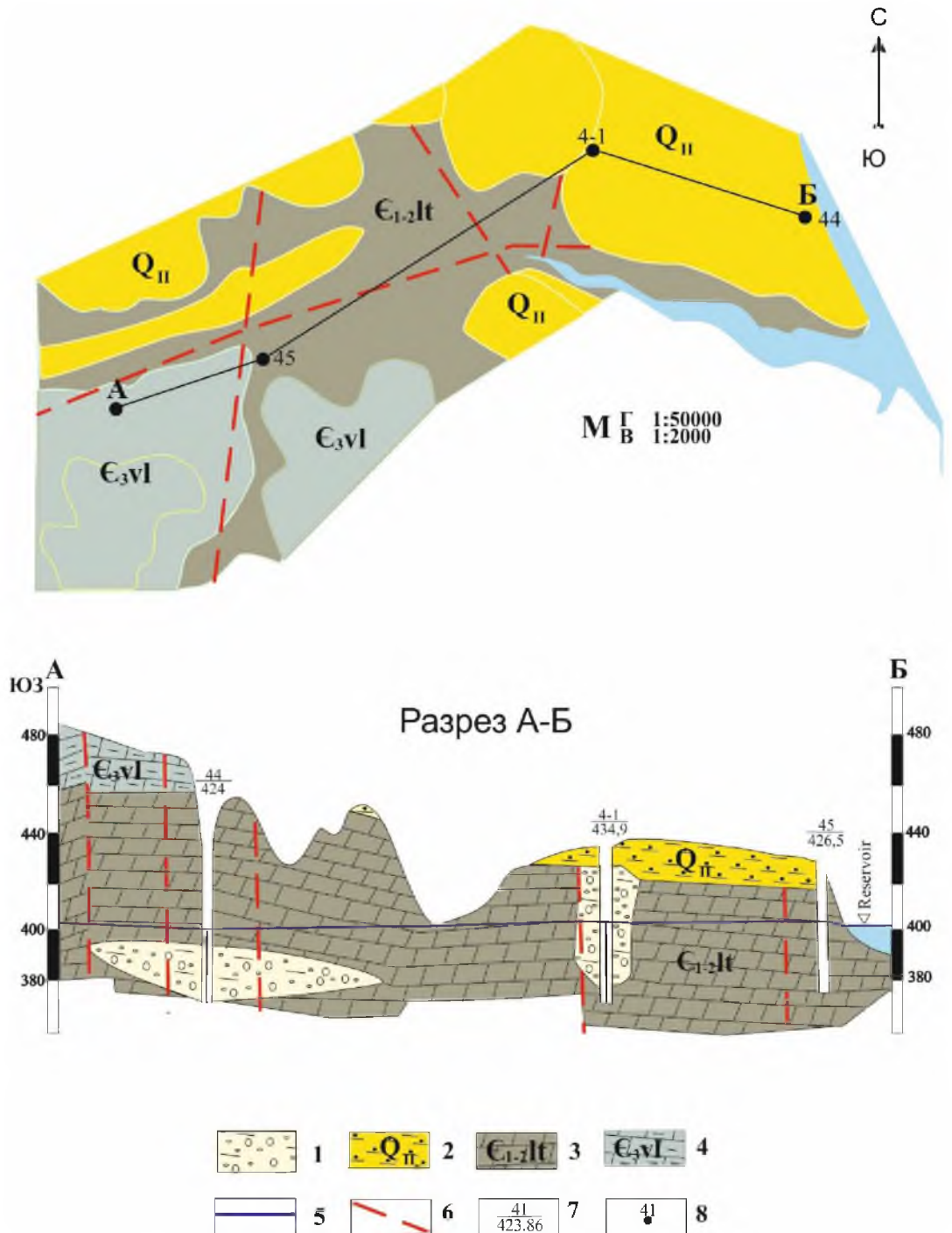


Рисунок 2.17. Геологическая карта и разрез берегового склона на юге Братского водохранилища (по материалам Прибайкальской партии, 1984 г).

1 – рыхлый материал, заполняющий карстовые полости; 2 – четвертичные отложения (песок, галька); 3 – нижнесреднекембрийские отложения (ариллиты, алевролиты); 4 – верхнекембрийские отложения (доломиты, гипс, известняки доломитизированные); 5 – уровень подземных вод; 6 – зоны разлома; 7 – номер скважины и абсолютная отметка устья; 8 – местоположение скважины.

Унаследованным карстовым процессом затронута практически вся толща ангарской свиты кембрийских отложений на юге Братского водохранилища. Моноклиально погружаясь на север, северо-запад с наклоном поверхности, не превышающим 5° , карстующиеся отложения перекрываются толщей коренных осадочных и слаболитифицированных четвертичных отложений разной мощности. На ангарской свите местами с угловым несогласием залегают красноцветные породы верхненеленской свиты верхнего кембрия: аргиллиты, алевролиты, мергели [Братское водохранилище, 1963]. На основе геологического строения толщи горных пород, слагающих побережье южной части Братского водохранилища, положения морфометрических отметок литологических разностей, проявления карстового процесса на дневной поверхности и внутри массива *выделены следующие типы карста*: бронированный, покрытый и открытый (рис. 2.18).

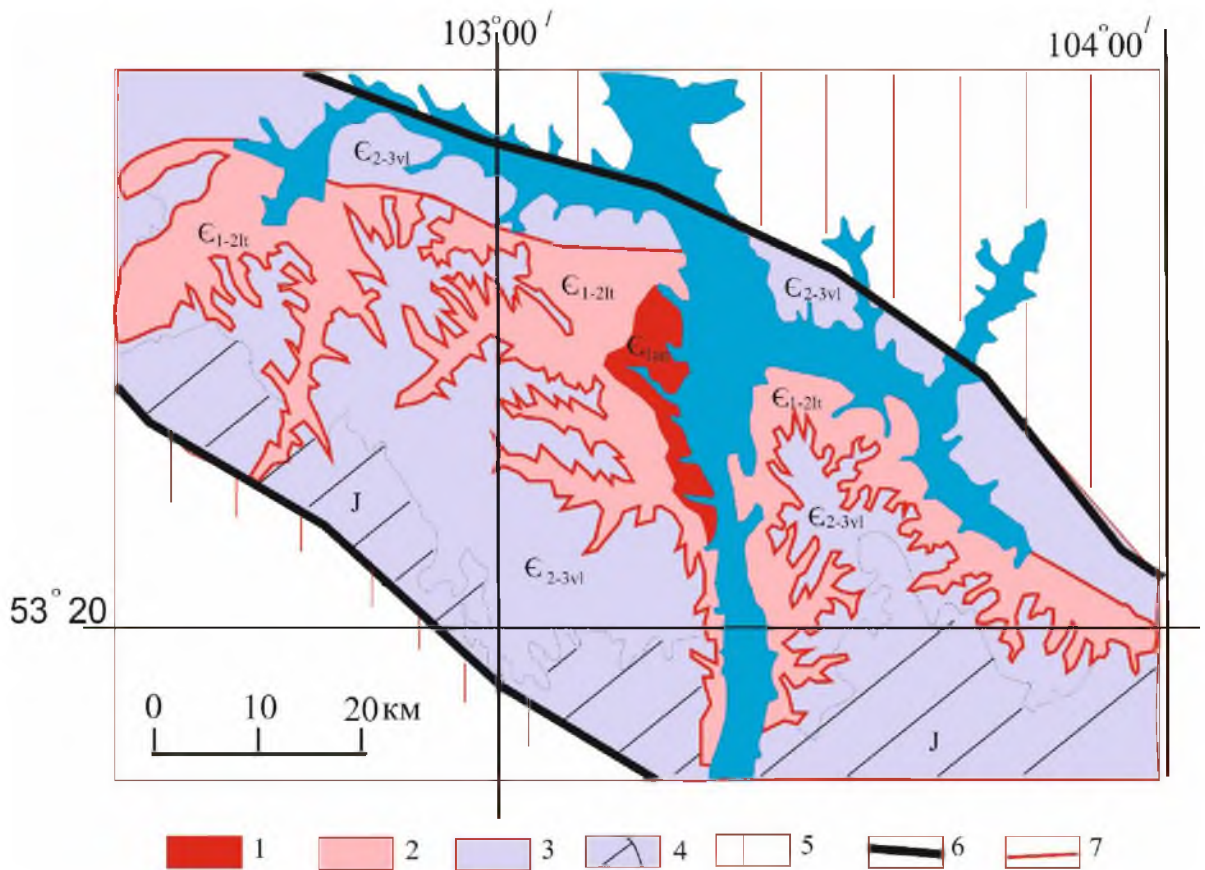


Рисунок 2.18. Карта-схема морфогенетических типов карста юга Братского водохранилища (составлена с использованием материалов Г.П. Вологодского, В.М. Литвина, ООО ИнжГео, 2007; Бохтайский отчет, 1984 г.).

1 – открытый тип карста; 2 – покрытый тип карста; 3 – бронированный тип карста; 4 – карст, бронированный юрским песчаником; 5 – площади без активизации техногенного карста; 6 – граница карстового района; 7 – граница карстовых типов.

При выделении морфогенетических типов карста использована классификация по степени обнаженности карстующихся пород, составу покровных отложений [Горбунова, 1985]: «покрытый» – перекрытый проницаемыми отложениями; «бронированный» бронирован коренными некарстующимися породами (определения даны по Г.А. Максимович и М.А. Зубашенко).

Морфогенетический тип *бронированного карста* характерен для водораздельных пространств и участков с абсолютными отметками выше 480–500 м, с наличием в разрезе непроницаемых отложений аргиллитов и алевролитов кембрийского возраста, юрских песчаников, перекрывающих карстующиеся породы. В основном это участки, удаленные от водохранилища. Потенциальное проявление техногенного карста возможно при условии дополнительных активных техногенных нагрузок, например интенсивных откачек воды из карьера при промышленной добыче гипса с формированием депрессионной воронки или значительных перепланировках поверхности с подрезкой склона и т.д. В естественном состоянии карстующиеся породы, перекрытые мощной толщей непроницаемых делювиально-пролювиальных отложений юрского песчаника, являются устойчивыми (мощность перекрывающих отложений до 100 м) и пригодны для промышленного и гражданского строительства.

Для склоновых участков с абсолютными отметками до 480 м, перекрытых выдержанным слоем проницаемых отложений различного генезиса (делювиальных, аллювиальных), характерно наличие *покрытого типа карста*. Эти территории являются потенциально опасными и требуют соблюдения строгих правил техники строительства зданий и сооружений, а также повышенного внимания при эксплуатации водонесущих коммуникаций во избежание утечек воды. На территориях развития покрытого карста необходима дополнительная детальная инженерно-геологическая оценка устойчивости перекрывающих отложений из-за особенностей состава и свойств четвертичных отложений, склонности к развитию сопутствующих экзогенных геологических процессов: эрозии, суффозии, просадок, оползней. Этому типу карста свойственна тесная связь с эксплуатационными колебаниями уровня воды в водохранилище и, соответственно, ежегодное обновление карстовых форм и формирование свежих.

Морфогенетический тип *открытого карста* локализован вдоль побережья и заливов Братского водохранилища. Вследствие эрозионно-денудационной активности и абразионной деятельности вод произошло обнажение карстующихся пород. Абсолютные отметки зоны развития открытого типа карста колеблются от 380 до 400–420 м. Именно в этой зоне вскрыты пещеры, гроты, ходы и формируются абразионные ниши в береговом уступе.

В пределах южной части Братского водохранилища на участках развития сульфатного карста проводятся мониторинговые работы по выявлению свежих форм и обновлению старых. При обследованиях карстовых районов Братского водохранилища картировались, фиксировались параметры обновления карстовых форм и других проявлений карстового процесса на дневной поверхности, о чем сообщалось в Государственных докладах «О состоянии и охране окружающей среды Иркутской области».

Вскрытие свежих карстовых форм и наличие деформаций на дневной поверхности было отмечено в 2003 г. Зафиксировано обновление карстовых воронок, вскрытие гротов, образование карстово-суффозионных провалов (рис. 2.19).



Рисунок 2.19. Карстовые формы (фото 2003 г.): А – обновление воронки в районе д. Мельхитуй; Б – вскрытие карстового грота Хадаханского карстового массива.

В 2009 г. проведенные экспедиционные работы в районе Хадахано-Мельхитуйского карстового массива выявили всплеск активности карстового процесса. Произошло обновление существующих карстовых форм, расширение и раскрытие трещиноватых зон, просадки территории, формирование новых единичных провалов и др.

В заливе Мухор-Желга от устья на расстояние около 300 м протянулась полоса гипсоносных пород. В береговом уступе в урзе вскрылась система карстовых полостей, гротов, пещер, трещинных зон. Полости представляют собой ходы, имеющие щелеобразную форму, шириной до 1,5 м, высотой до 5 м. Самый длинный ход достигал

8 м и ориентирован вкрест простирания береговой линии. В глубь берегового массива ходы сужаются, превращаясь в трещинные зоны, уходящие в массив. Некоторые ходы-гроты соединены между собой в подводной части. В привходовых частях гротов и ходов наблюдаются завалы из обломков и крупных глыб гипса. Карстовые полости заполнены глиной и льдом. Завершается трещиноватая зона на склоне двумя провалами глубиной по 2,5 и шириной 4,25 м. Два свежих провала имеют вытянутую форму, ориентированы параллельно берегу.

Свежие карстовые воронки наблюдались также в средней части залива Шалоты, где коренные породы скрыты под толщей покровных отложений. Глубина одного из провалов достигала 4 м. Карстовые воронки вскрыли вход в пещеру. Пещера представляла собой раскрытую щель, уходящую в глубь склона на 17 м и ориентированную перпендикулярно береговой линии. Высота свода на входе – 3,7 м, ширина хода – 1,2 м, видимая длина – 6 м. В пяти метрах от входа – провал размерами 25х55 см и глубиной 5,5 м.

Выше по склону обнаружена еще одна карстовая полость. Она представляет собой ход шириной 0,5 и высотой 5,6 м. Вход в пещеру находится на дне свежего провала. Основным заполнителем пещер является жидкая глина и лед. Вмещающая порода – гипс слоистой структуры, слои -- от белого до темно-серого цвета.

Морфология вышеописанных карстовых форм предопределяется тектонической и литологической трещиноватостью вмещающих горных пород. В пределах описываемой территории существуют две основные системы тектонической трещиноватости: юго-восточного и северо-восточного простирания, которые и определяют общую картину распространения и расположения поверхностных и подземных карстовых форм. Подземные полости представляют собой ходы, образованные выщелачиванием коренных горных пород по тектоническим и литологическим трещинам. Поверхностные карстовые формы также приурочены к тектонически ослабленным зонам. В пределах береговой линии, сложенной карстующимися породами, хорошо видна тектоническая трещиноватость в массиве гипса и ангидрита. В 2009 г. произошел вывал крупных блоков пород в абразионном уступе, обрушив свод существующей несколько лет эфемерной пещеры (рис. 2.20).

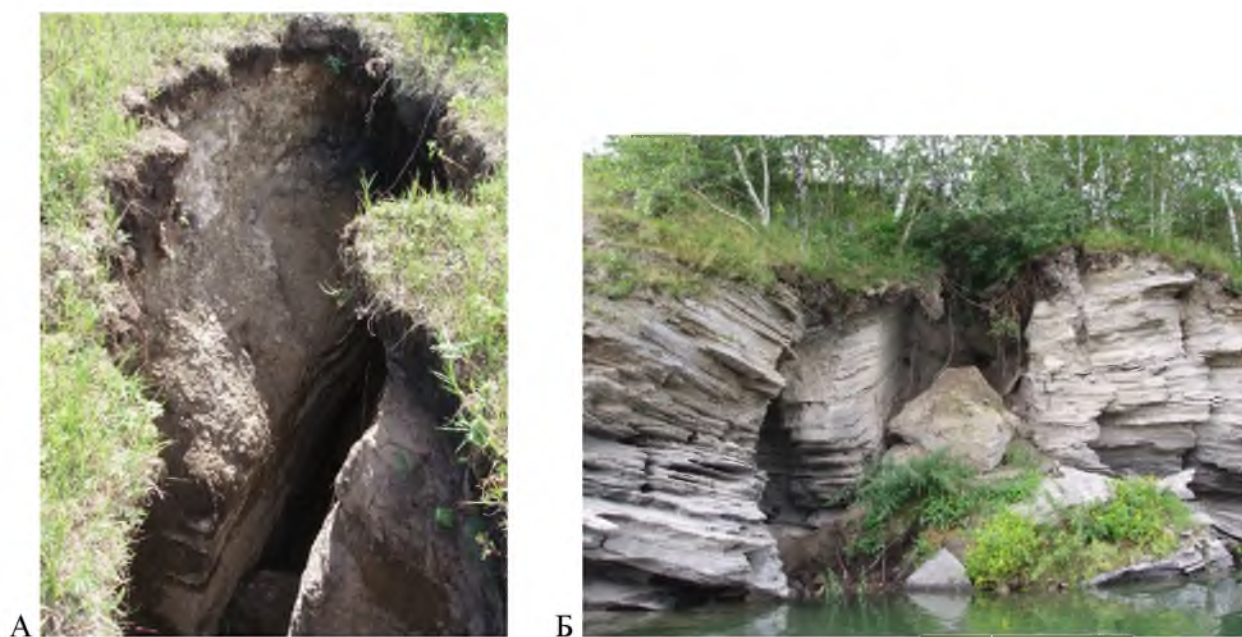


Рисунок 2.20. Береговой склон: *А* – трещиноватость горных пород; *Б* – обрушение эфемерной пещеры в абразионном уступе (фото 2009 г.).

В 2011 г. в зонах распространения открытого типа карста (в доломитах литвинцевской свиты среднего кембрия) и покрытого типа карста был зафиксирован очередной всплеск проявления карстовых форм на дневной поверхности. Отмечалось образование свежих просадок, провалов, воронок, разрыв дерна, вскрытие трещин, провалы перекрывающих отложений в карстовые полости, объединение отдельных карстово-суффозионных форм и др. (рис. 2.21).

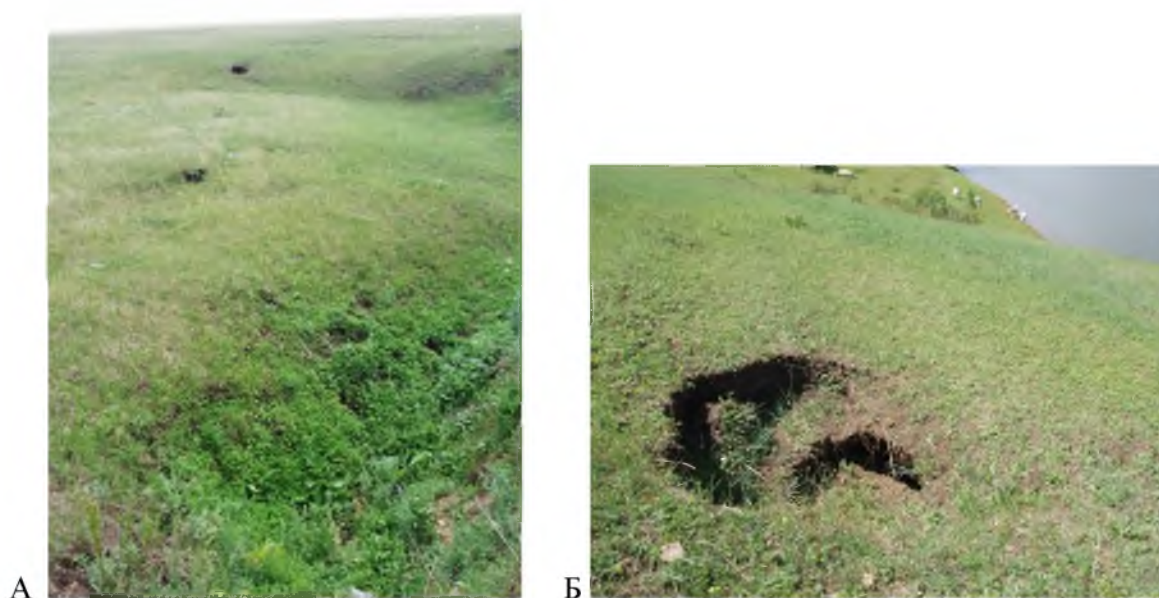


Рисунок 2.21. Свежие карстовые формы: *А* – просадка территории; *Б* – разрыв дерна, вскрытие карстовой воронки (фото 2011 г.).

Динамика современного карстового процесса стабильна, периоды активизации проявлений на дневной поверхности тяготеют к циклам понижения уровня воды вслед за этапом высоких положений и длительного стояния на высоких отметках. Обводнение массивов горных пород и длительное положение высоких отметок уровня воды в водоеме способствуют проникновению пресных вод в массив горных пород, насыщению водных растворов хлоридами (Na, K), сульфатами, карбонатами (Ca) и развитию карста. Всплеск карстопроявления и обновления карстовых форм на дневной поверхности на берегах Братского водохранилища зафиксирован в 2003, 2009 и 2011 гг., что соотносится с периодами относительного понижения уровня воды в водоеме. Сам процесс выщелачивания горных пород в массиве протекал на этапах 2000 – 2001, 2002 и 2005 – 2007 г., 2010 г. – флуктуации уровня воды, периоды наполнения и высокого положения уровня.

В пределах Усть-Илимского и Богучанского водохранилищ распространен карбонатный тип карста, интенсивность его развития слабее. Ширина зоны развития карбонатного карста в пределах Усть-Илимского водохранилища 0,5–1,0 км, карстовый процесс на данной территории не является ведущим [Усть-Илимское водохранилище, 1975; Овчинников, 1999]. При изысканиях под плотину Богучанской ГЭС были вскрыты проявления глубинного карста. Подземные полости фиксировались при бурении по провалам бурового инструмента и наличию карбонатных пород суглинков и глин, выполняющих древние карстовые формы, размер которых обычно не превышает 0,5–1,0 м [Богучанское водохранилище, 1979]. Процессы выщелачивания карбонатных пород имеют малую скорость и не могут за короткое время формировать внушительные полости, каналы, пустоты [Филиппов, 1988].

2.3. Экзогеодинамика зоны влияния: этапы эволюционных преобразований экзогеодинамической обстановки

В долине реки Ангары были последовательно построены четыре дамбы гидроэлектростанций и сформированы (наполнены) водохранилища – сооружения повышенного класса ответственности. До заполнения была проведена подготовка ложа водоема к затоплению, и с момента набора воды и запуска в эксплуатацию начались процессы формирования водного резервуара и береговых склонов. Период наполнения котловины искусственного водоема в среднем занимал от 2 до 6 лет, запуская механизм адаптации геологической среды к новым техногенным условиям. Произошла смена механизма гидравлического речного потока воды на озерный режим формирования ветро-волновых потоков. Стала развиваться абразия берегов, для искусственных водохранилищ

этот процесс называется переработкой склонов. Первый период наполнения и эксплуатации каждого из водохранилищ характеризовался значительными размывами берегов, отступанием бровки склона в глубь массива, формированием оползней, активизацией карста [Хабидов и др., 2009; Кусковский, 1974; Пуляевский и др., 1971; Печеркин, 1969; Проблема охраны геологической среды, 1993; Филиппов, 1984, 1988; Литвин, 1989, 1996; Кусковский и др., 2000; Тржцинский и др., 2005].

Созданные в долине р. Ангары водоемы имеют ряд особенностей, объединяющих их в единую группу и отличающих от других водохранилищ европейской части России и ряда стран [Овчинников и др., 1999; Тржцинский и др., 2005]. Плановое очертание котловин predetermined рисунком положения затопленных частей речных долин – Ангары, Оки, Ии, Илима, Коды. По генезису водохранилища ангарского каскада хорошо вписываются в классификации, разработанные А.Б. Авакяном, Ю.М. Матарзиным, В.П. Салтанкиным, В.А. Шараповым и др. [Авакян и др., 1987]. Водоемы, созданные в долинах рек, перегороженных плотинами, линейно вытянуты, имеют сложную конфигурацию с чередованием сужений и озеровидных расширений, на отдельных участках существенно разветвленные. Коэффициент извилистости береговой линии на водохранилищах достигает 5,5 [Пуляевский и др., 1971; Овчинников и др., 1999].

За период эксплуатации водохранилищ произошло преобразование рельефа, или, точнее, морфометрии склонов и междуречных пространств. Практически полностью затоплено большинство речных террас, т.е. зеркало воды на отдельных участках затопленных долин сопрягается с крутыми склонами, что приводит к их неустойчивости. Изменились соотношения участков различной крутизны. Так, в пределах зоны влияния ангарских водохранилищ доля участков крутизной до 10° уменьшилась с 91 % до затопления до 78 %, в то же время существенно увеличилась площадь территорий с уклонами $10-15^\circ$, на их долю сейчас приходится 18 % от 7 % до эксплуатации [Овчинников, 1999; Тржцинский и др., 2005].

Этапы эволюционных преобразований геологической среды

Иркутское водохранилище

С 1956 года по 1980 год на Иркутском водохранилище сформировались основные генетические группы берегов. Протяженность абразионной группы берегов составила 105 км, аккумулятивные берега имели ограниченное распространение – 3–4 км, неразмываемые составили 116 км [Формирование берегов Ангарских водохранилищ, 1976; Иркутское водохранилище, 1980].

К 90-м годам прошлого века протяженность абразионных берегов увеличилась до 140 км (51 % от общей протяженности береговой линии), а максимальные размывы достигли 150 м за период эксплуатации [Изменение геологической среды, 1985; Овчинников, 1999]. В процессе эволюции береговой линии, углубления отмели и увеличения ее крутизны неразмываемые берега заливов вблизи основной акватории водохранилища, пологие береговые склоны основной акватории перешли в абразионные.

К 2000-м годам отмечается стабильное увеличение общей протяженности абразионного типа берега. Абразионные процессы развиты на берегах протяженностью более 150 км, что составляет уже 54,3 % от их общей длины. Длина береговой линии увеличилась и составила 276 км. Площадь потерянных земель увеличилась до 400 га [Абразионно-аккумулятивные процессы в береговой зоне водохранилищ, 2002].

К 2018 году протяженность абразионного типа берега составляет около 152 км [Тарасова, Козырева, 2011] – более 55 % от общей протяженности береговой линии.

Таким образом, эволюционные преобразования геологической среды в результате наполнения и эксплуатации Иркутского водохранилища имеют направленность к увеличению протяженности абразионных берегов и незатухающей активности абразионного процесса.

Среди абразионных берегов Иркутского водохранилища выделены участки высокой, средней и слабой степени активности абразионного процесса (рис. 2.22).

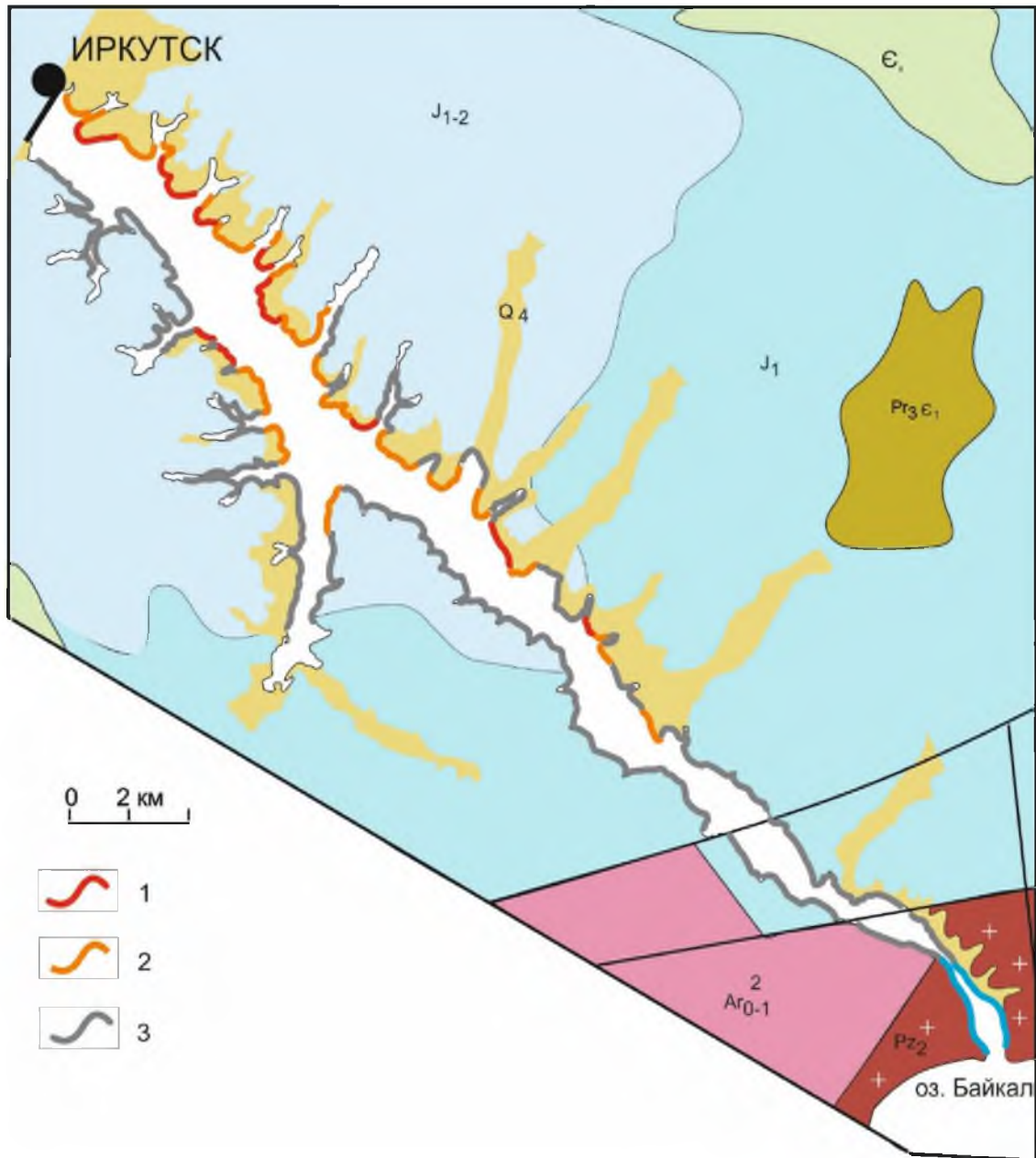


Рисунок 2.22. Карта степени активности абразионного процесса Иркутского водохранилища за весь период эксплуатации (условные к геологической основе карты см. рис. 1.2): 1 – высокая – 50–300 м; 2 – средняя – 30–50 м; 3 – слабая – до 30 м.

Установлено, что максимальной трансформации подвержены мысовые участки акватории, сложенные четвертичными отложениями (суглинки и супеси). При сопоставлении контуров положения береговой линии начального этапа эксплуатации водоема (составлена по результатам дешифрирования аэрофотосъемки) и положения современной береговой линии (по данным космоснимков открытого доступа) выявлены существенные различия. Контурсы береговой линии заливов остались в прежних пределах, фактически не изменив своего положения за почти 60-летний период эксплуатации водохранилища, а мысовые участки значительно размыты и отступили в глубь склонов

(рис. 2.23). Мысовые участки испытывают большие ветроволновые нагрузки, чем участки, расположенные в заливах. Мысовые части основной акватории размываются со скоростью до 2,5 м/год – район д. Грудиного, до 3,5 м/год – район в пос. Ново-Разводная [Козырева и др., 2012].



Рисунок 2.23. Карта-схема трансформации правобережной береговой линии Иркутского водохранилища за период эксплуатации, с 60-х годов до 2015 года (составили: Козырева Е.А., Тарасова Ю.С.)

1 – массивы с многоэтажными зданиями; 2 – массивы с малоэтажными постройками; 3 – лесные земли; 4 – пахотные земли; 5 – карьеры; 6 – положение береговой линии в 1961 г.; 7 – современное положение береговой линии (2015 г.); 8 – количественные показатели отступления бровки берега; 9 – укрепленные берега.

Максимальные размывы и отступление береговой линии за период эксплуатации достигли: пос. Молодежный – 300 м, Ново-Разводная – 200 м, микрорайон «Солнечный» – 128 м. В связи с экстремальными размывами береговых склонов были приняты решения по укреплению берегов: в микрорайоне «Солнечный» возведено техногенное укрепление берега на участке от ледокола «Ангара» до пристани «Ракета», укреплен участок «Молодежный» протяженностью 3000 м (в рамках реализации ФЦП «Охрана озера Байкал

и социально-экономическое развитие Байкальской природной территории на 2012–2020 годы»).

При увеличении годового положения уровня в пределах береговых склонов Иркутского водохранилища произойдет очередное переформирование профиля берегового склона. Участки, сложенные горными породами, не устойчивыми к выветриванию и абразионному размыву, будут претерпевать значительные абразионные нагрузки, и деформации с потерей земель разных категорий хозяйственного использования продолжатся.

Братское водохранилище

В пределах Братского водохранилища по состоянию *на 1970 год* протяженность неразмываемых берегов составила около 700 км, абразионных – 1100 км. Размывы не превышали 70 м [Формирование берегов ангарских водохранилищ, 1976]. Аккумулятивные берега на водохранилище в первые годы его существования не имели широкого развития как по количеству и разнообразию форм, так и по их площадному распространению [Братское водохранилище, 1978].

По состоянию *на 1996 год* приводятся данные по протяженности берегов: размываемых 2056 км (34,2 % от общей протяженности береговой линии). Отмечено приращение протяженности абразионных берегов с первого этапа эксплуатации: 1966 г. – 700 км абразионных берегов, 1970 – 1100 км, 1975 г. – 1300 км. Общая площадь потерянных земель за счет абразии 4500 га. Аккумулятивные берега не получили широкого развития. Территориально большее количество аккумулятивных образований приурочено к южной части водохранилища. Общая протяженность аккумулятивного типа берега не превышает 20 км [Овчинников и др., 1999].

В пределах Братского водохранилища в связи со значительными эксплуатационными колебаниями, как сезонными, так и многолетними, сохраняется самая высокая абразионная активность на берегах водохранилища из всех водоемов каскада. Прогнозные величины размыва, составленные Г.И. Овчинниковым до 2021 г., в большей части уже реализованы. Высокая степень абразионной активности приурочена к участкам берега, сложенного рыхлыми суглинистыми отложениями, облессованными суглинками и супесями. Участки со средней степенью активности абразионного процесса преобладают на большем протяжении абразионных берегов, величина абразионной переработки за период эксплуатации на таких участках составила от 30 до 50 м. Остальным берегам свойственно более слабое проявление абразионного процесса, размывы таких берегов за период эксплуатации находятся в пределах величин до 30 м (рис. 2.24).

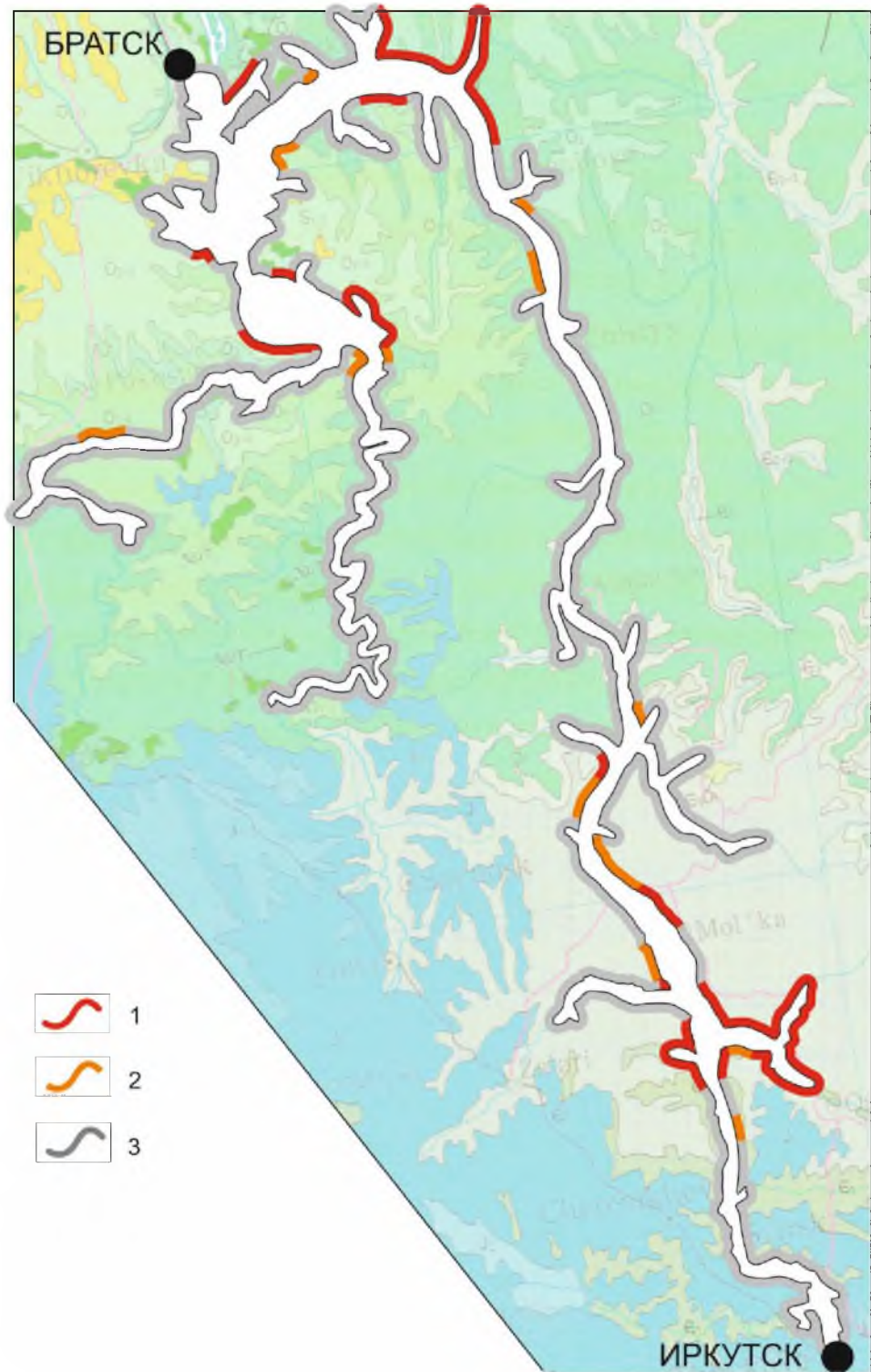


Рисунок 2.24. Карта степени активности абразийного процесса Братского водохранилища за весь период эксплуатации (условные обозначения к геологической основе карты см. рис. 1.2): 1 – высокая степень – 50–200 м; 2 – средняя – 30–50 м; 3 – слабая – до 30 м.

Усть-Илимское водохранилище

Динамика абразионного процесса на берегах Усть-Илимского водохранилища, по сравнению с Иркутским и Братским водохранилищами, незначительна, также прослеживается цикличность развития, связанная с эксплуатационными колебаниями уровня водоема. Максимальные размывы в суглинках достигли 60 м, по основной акватории не превышают 10 м. Протяженность размываемых берегов к 1993 г. достигла 630 км – 26,43 % от общей протяженности берегов [Овчинников, 2003]. Показатели абразионных размывов берегов Усть-Илимского водохранилища в настоящее время не высокие, это связано с тем, что эксплуатационный режим водоема стабилизировался, профиль берега врезался в коренную основу и во многом на современном этапе эксплуатации предопределяется скоростью развития процессов выветривания горных пород.

Богучанское водохранилище

В связи с малым периодом эксплуатации технического объекта работы по изучению состояния геологической среды после наполнения водоема еще не проводились и оценить степень преобразования геологической среды пока не представляется возможным.

Между тем переработка береговых склонов сопровождается проявлением гравитационных процессов, эрозии, активизацией карста и криогенных процессов. Эксплуатационный режим технических объектов, положение уровня воды и их флуктуации являются одними из основных факторов, влияющих на динамику развития береговых экзогенных процессов.

Оползневые процессы на берегах ангарских водохранилищ имеют локальные проявления. За период наполнения и эксплуатации водохранилищ отдельные оползневые склоны стабилизировались, например участок Ершовский на Иркутском водохранилище, Куйский, Аталонский, Силотский – на Братском водохранилище. Однако в большинстве случаев динамика оползневых деформаций на береговых склонах зависит от положения уровня в водохранилище. По результатам мониторинга оползневых участков Балаганского расширения Братского водохранилища в период с 2001 по 2010 г. получен график, свидетельствующий о всплеске оползней на берегах водохранилищ в период высокого положения уровня воды в водоеме (рис. 2.25). Снижение оползневой активности характерно для периодов снижения уровня и низкого положения уровня воды в водоеме, что объясняется снижением обводненности горных пород берегового массива и снижением влажности, повышением прочностных показателей глинистых отложений.

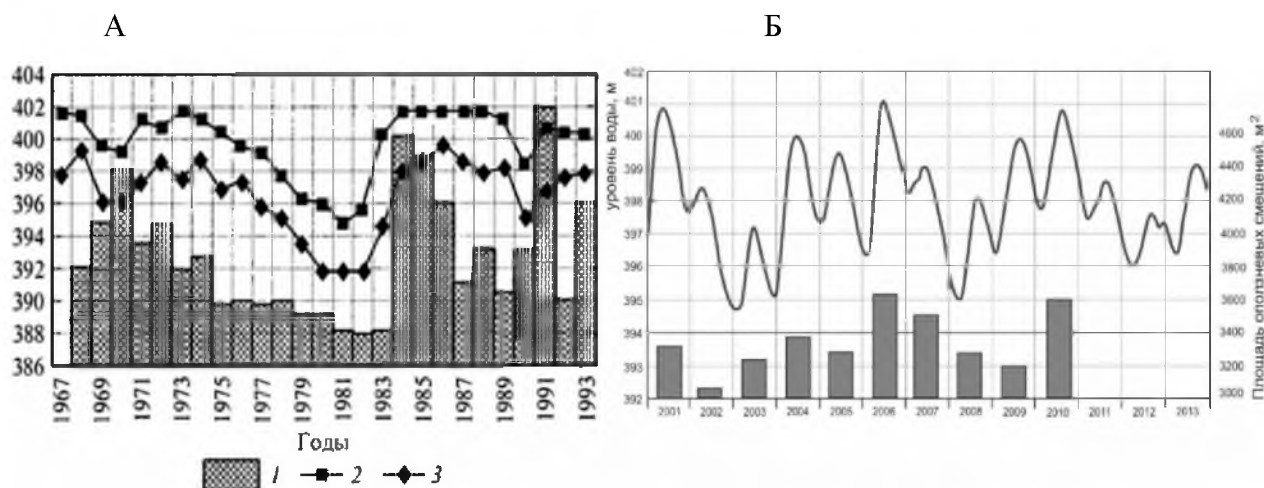


Рисунок 2.25. Активность оползней на Братском водохранилище в зависимости от колебания уровня. *A* – период 1967–1993 гг. [Овчинников и др., 1999]; *B* – период 2001–2010 гг. (мониторинговые данные по Балаганской акватории Братского водохранилища):

1 – оползневые смещения (м); 2 – максимальный уровень воды; 3 – минимальный уровень воды.

Наиболее яркое проявление в зоне влияния водохранилищ за период эксплуатации имеет карстовый процесс. Наибольшая динамика присуща сульфатному карсту, который широко проявляется в южной части Братского водохранилища. За период мониторинговых работ в период с 2000 по 2015 год зафиксировано образование на дневной поверхности 14 новых воронок, обновление ранее существующих форм в карстовых районах водохранилища – Хадахано-Мельхитуйский массив и участок «Рассвет». Карстовые формы на дневной поверхности проявляются в периоды снижения уровня воды в водохранилище. Всплеск карстовых деформаций на поверхности горного массива произошел в 2003, 2009 и 2011 гг., после периодов высокого положения уровня воды в водохранилище. Тенденция развития сульфатного карста в зоне аэрации берегового склона сохраняется.

В первый период эксплуатации Братского водохранилища сформировалось 5–9 воронок в год на площади 1 км² [Филиппов, 1988]. Выщелачивание карстующихся пород зоны аэрации в сульфатных породах происходит интенсивно, за 12–40 лет из волосной трещины полость достигнет 1 м, а в карбонатных породах (известняки, доломиты) для формирования такого же размера пустоты потребуется от 15 до 53 тыс. лет. Присутствие в геологическом разрезе сульфатных пород, сульфатно-карбонатных разностей дает основание полагать, что при существующих эксплуатационных колебаниях динамика

карста будет сохраняться на уровне современных параметров – около 14 новых форм за 15 лет.

Карстовые формы, закартированные на территории юга Братского водохранилища, имеют неравномерное распространение по площади и виды их проявления тяготеют к региональным зонам трещиноватости. Карстовые воронки маркируют тектонически ослабленные, сильно трещиноватые зоны [Литвин, 1989]. В.М. Литвин в 1983 г. выделил на территории юга Братского водохранилища зоны повышенной активности, вероятной активизации карста. Динамика карстового процесса в период с 2000 по 2015 год на дневной поверхности проявилась в пределах трех ранее выделенных зон в виде обнавления и проявления свежих карстовых форм. Сохраняется высокая степень активности современного карстового процесса. Выделены три зоны активности современного карстового процесса на юге Братского водохранилища (рис. 2.26).

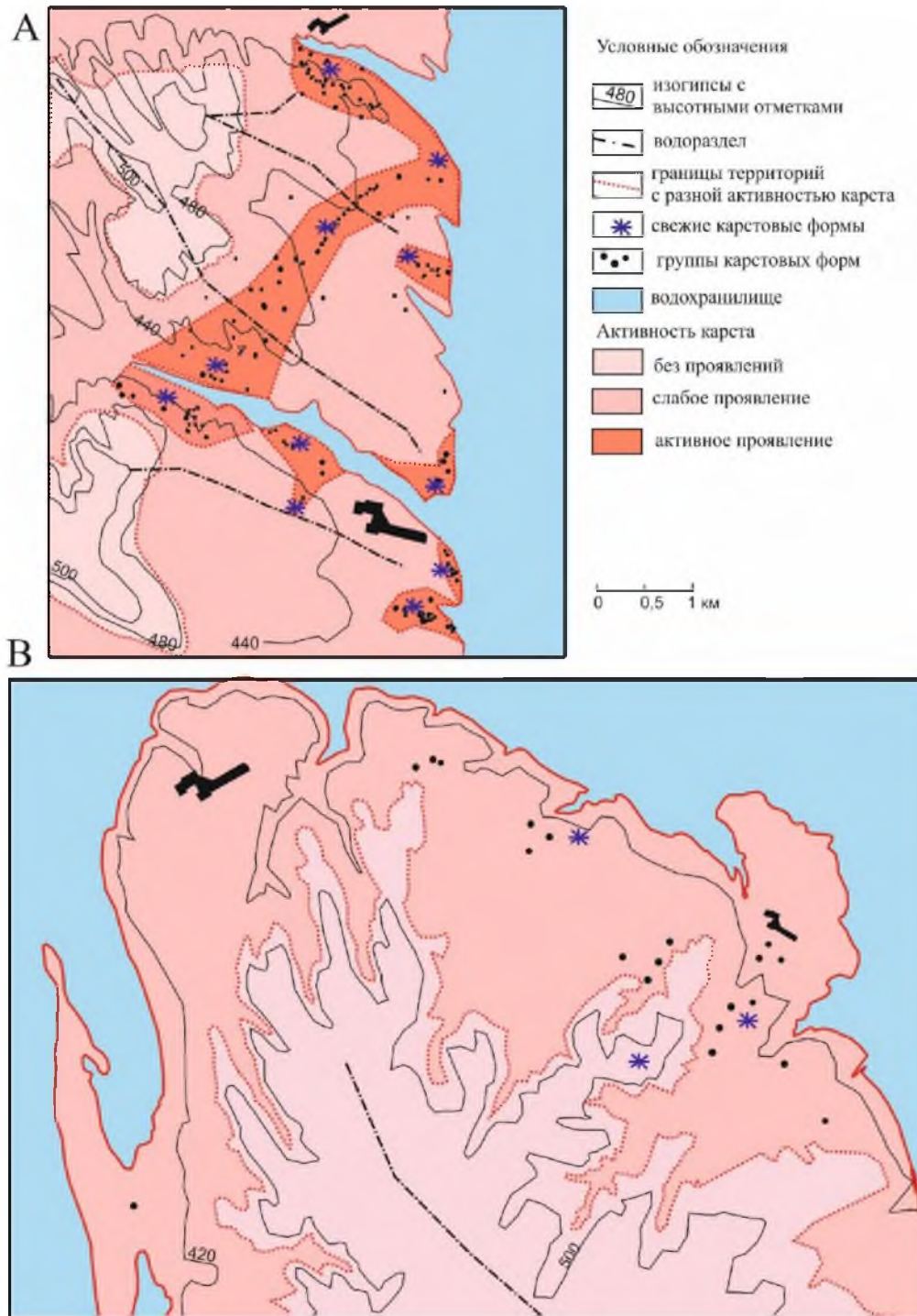


Рисунок 2.26. Активность карстового процесса Хадахано-Мельхитуйского массива и участка «Рассвет» (составлена с использованием материалов В.М. Литвина, карты Бохтайского отчета, ООО ИНЖГео и мониторинговых данных с 2000 г.).

1-я зона. Территории с активным проявлением карстового процесса на дневной поверхности – участки распространения открытого типа карста, где установлены эпизоды обновления карстовых проявлений и зафиксированы образования свежих карстовых полостей, провалов, гротов, эфемерных пещер и других карстовых форм на дневной поверхности за последние 15 лет. Карстовый процесс активно влияет на преобразование

рельефа, провоцирует развитие сопутствующих экзогенных процессов. Карстовые формы имеют коррозионно-гравитационный, карстово-эрозионный и абразионно-карстовый генезис. В первом случае вскрываются полости в виде одиночных провалов глубиной до 20 м и проявляются карстово-оползневые деформации, во втором – карстовые воронки, соединяясь, образуют крупные эрозионные формы; на прибрежных территориях водохранилища распространен особый тип берега.

2-я зона. Территории слабого проявления карстового процесса на дневной поверхности – участки территории, расположенные в пределах покрытого морфогенетического типа карста с единичными и редкими случаями обновления карстовых проявлений на дневной поверхности. С учетом длительности развития техногенного карста в массиве горных пород и несмотря на редкость формирования деформаций на поверхности, сохраняется высокая вероятность проявления деформаций на земной поверхности по унаследованным ослабленным зонам и возможность образования провалов, гротов, просадки грунта и других деформаций.

3-я зона. Территории без проявления карстовых форм на дневной поверхности – это участки, которые соотносятся с распространением бронированного морфогенетического типа карста и гипсометрически располагаются выше 480–500 м. Карстовый процесс в массиве присутствует, о чем свидетельствуют инструментальные геолого-геофизические исследования, однако развивается в глубине массива. Карстовых деформаций на земной поверхности не отмечено, за исключением участков с дополнительным техногенным нарушением целостности перекрывающих отложений.

Карстовый процесс на берегах Братского водохранилища демонстрирует стабильную динамику, с приращением свежих форм, проявлением деформаций на дневной поверхности, наличием ежегодных обновлений, периодическим вскрытием свежих форм. Проявления деформаций на дневной поверхности локализованы в южной части Братского водохранилища на территории распространения открытого и покрытого морфогенетического типа карста.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

Условия геологической среды – сочетание климатических, геоморфологических, структурно-геологических, состава и состояния горных пород, гидрогеокриологических факторов с эксплуатационными параметрами созданных долинных водохранилищ – предопределили особенности формирования экзогеодинамической обстановки береговых склонов искусственных водоемов, подводной и надводной его части, динамику развития современных экзогенных геологических процессов.

Смена экзогеодинамических обстановок в ходе эксплуатации энергетических объектов демонстрирует высокую динамику экзогенных процессов. Абразионные размывы сохраняют высокие темпы переработки береговых склонов на протяжении всего периода существования каскада ангарских водохранилищ, реализуя прогнозные величины по отступанию бровки берега и наращивая протяженность абразионного типа берега. Эксплуатационные параметры колебания уровня не приводят к выработке устойчивого профиля равновесия берегового склона. Стабильно высокие параметры переработки берегов водохранилищ и неспадающая активность абразионного процесса (максимальные размывы на Иркутском водохранилище 300 м, Братском – 200 м), увеличение протяженности размываемых берегов за время эксплуатации водохранилищ позволяют отнести абразионный процесс к группе регионально опасных экзогенных геологических процессов. Стабилизации абразионных процессов на берегах ангарских водохранилищ не выявлено. Высокая степень активности абразионного процесса приурочены в основном к участкам расположенным по основной акватории водоемов и/или распространения не устойчивых к размывам горных пород.

Активность оползневого процесса во многом предопределяется положением уровня воды в водоеме и обводненностью горных пород берегового склона. Отмечается всплеск оползневых деформаций на берегах водохранилищах в период высокого положения уровня воды в водоеме. Относительное снижение активности оползней наступает в период снижения уровня и низкого положения уровня воды в водохранилищах. Отмечена активизация оползневого процесса на унаследованных участках, формирование свежих деформаций на склонах, где сформировались специфические условия для оползневых смещений (в основном по круглоцилиндрической или наклонной плоскости смещения). Оползневые процессы на берегах ангарских водохранилищ имеют локальное распространение. Общая протяженность пораженных оползнями участков не превышает 0,1 % от общей протяженности береговой линии водохранилищ. Оползневые процессы на береговых склонах в большинстве случаев не

угрожают жизни людей, приводят к потере земель и осложняют эксплуатацию прилегающих к водохранилищу территорий.

Активность карстового процесса остается высокой на протяжении всего периода эксплуатации Братского водохранилища. Высокая динамика карстового процесса характеризуется развитием сульфатного карста. За период мониторинга 2000–2015 гг. установлено, что проявилось 14 новых форм, отмечались обновления старых карстовых форм. Проявление карстовых деформаций на дневной поверхности тяготеет к периодам понижения уровня воды в водохранилище. Активный современный карстовый процесс локализован в зонах структурно-тектонической неоднородности горных пород и вдоль побережья водохранилища. В разрезе выделен открытый и покрытый тип карста.

Длительная эксплуатация водохранилищ Ангарского каскада ГЭС привела к необратимым эволюционным преобразованиям геологической среды, формированию специфической экзогеодинамической обстановки зоны влияния долинных водохранилищ, которая во многом предопределенной эксплуатационными колебаниями уровня воды в водоемах. Произошли необратимые изменения в морфологии склонов, значительная переработка береговых склонов, развитие комплекса экзогенных геологических процессов - активизация унаследованных, возникновение новых, не свойственного ранее для данной территории (абразионный процесс). Совместное развитие экзогенных геологических процессов, динамика которых во многом предопределяется цикличностью положения уровня воды в сезонном и многолетнем плане, сформировало особую экзогеодинамическую обстановку в зоне влияния водохранилищ.

Глава 3. Береговая зона озера Байкал

Озеро Байкал – уникальный природный объект, обладающий колоссальным объемом воды – 23 тыс. км³, что превышает объем всех пяти Великих американских озер. В котловине Байкала сосредоточено около 20 % мировых запасов поверхностных пресных вод и более 80 % запасов России. Байкал – самое глубокое пресное озеро на планете Земля (1642 м). Площадь водной поверхности 31,5 тыс. км². На берегах древнего озера сохранено разнообразие ландшафтов, памятников природы и археологии, эндемиков фауны и флоры. Озеро Байкал внесено в список объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО, и в 2006 году правительством Российской Федерации утверждены границы байкальской природной территории. К побережью Байкала примыкают 12 особо охраняемых природных территорий, в том числе 3 заповедника, 3 национальных парка, 6 заказников. Сохранение озера Байкал и его уникальной природной среды для настоящих и будущих поколений является главной природоохранной задачей и важнейшим условием устойчивого развития Байкальского региона [Государственный доклад..., 2012].

Береговая зона океанов, морей и крупных замкнутых водоемов определяется как область современного взаимодействия водоема и суши. Основные черты береговой зоны рассмотрены в работах О.К. Леонтьева (1961), В.П. Зенковича (1962), В.В. Лонгинова (1963) и других исследователей. Выделяются следующие основные элементы береговой зоны: I – приморье, с поднятыми террасами; II – береговая зона – зона взаимодействия суши и моря; III – погруженные террасы (рис. 3.1.).

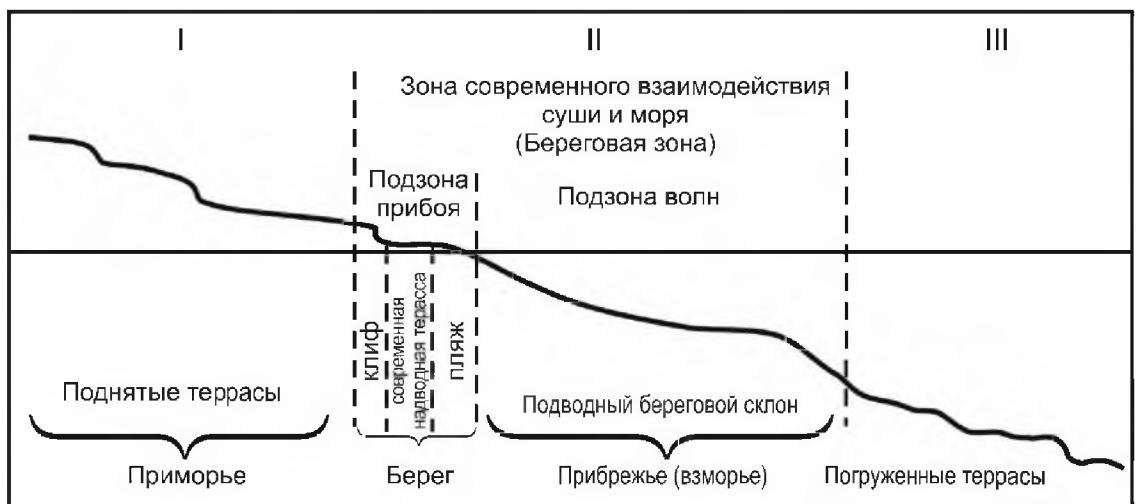


Рисунок 3.1. Схема строения побережья водоемов (по О.К. Леонтьеву, [1961]).

Мелководная часть дна называется подводным береговым склоном. Полоса суши, в пределах которой имеются формы рельефа, созданные морем при данном среднем уровне, называется берегом. Переходная, прибойная, зона мигрирует в зависимости от положения

уровня. Нижняя граница подводного склона, а в данном понимании – береговой зоны, не является постоянной, и ее положение определяется параметрами ветроволнового режима и уровнем воды при его регулировании. Уточнение понятий «берег», «побережье», «береговая зона» направлено на выделение признаков, позволяющих провести пространственные границы изучаемых форм рельефа и создающих их процессов [Игнатов, 2004]. Ниже рассматривается «береговая зона», в которой происходят основные эволюционные преобразования геологической среды в сложившихся природно-техногенных условиях и развиваются экзогенные геологические процессы, внося свой вклад в формирование облика современного побережья озера Байкал.

3.1. Климатические и инженерно-геологические условия

Климатические условия

Климатические особенности региона определяются географической широтой и положением озера вблизи центра Азиатского материка с присущей ему суровой континентальностью. Высокие горные хребты, обрамляющие Байкал, уменьшают влияние внешних условий на климат котловины, одновременно ограничивая климатическое воздействие озера на окружающую территорию. Озеро Байкал выделено как особая климатическая провинция с чертами океаничности – с относительно мягкой зимой и прохладным летом. Средняя годовая температура воздуха в южной части Байкала $-0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, в средней $-1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, в северной $-3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Переход температуры через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит осенью в октябре–ноябре, весной – в феврале–марте. Температура воздуха в пределах оз. Байкал во многом определяется температурой подстилающей водной поверхности. В течение года средняя температура над водной поверхностью меняется от -21° зимой до $+15^{\circ}$ летом в открытой части озера. Существенное отепляющее влияние на температуру воды прибрежных участков оказывает вынос теплых вод большими реками – Селенгой, Баргузином, Верхней Ангарой и другими, в связи с чем температура воды летом в придельтовых участках рек и в заливах достигает $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Количество осадков над территорией в годовом цикле распределено неравномерно. В холодный период (ноябрь–март) выпадает от 7 до 21 % годовой суммы. Меньшее количество зимних осадков в средней части Байкала, наибольшее количество отмечается в северной и северо-восточной части котловины. В теплый период года, в основном в июле–августе, выпадает преобладающее количество осадков, до 93 %. Наибольшее количество осадков выпадает на обращенных к Байкалу наветренных склонах гор восточного и особенно юго-восточного побережья при подъеме и охлаждении влажного

воздуха, приносимого циклонами. Годовая сумма осадков 200–250 мм [Байкал. Атлас, 1993; Инженерная геология Прибайкалья, 1968].

Большой вклад в особенности развития береговой зоны вносят ветроволновые условия побережья. Ветровой режим на Байкале отличается сезонной периодичностью направления и силой преобладающих ветров. В холодном сезоне ветры направлены с суши на озеро, а в теплом – с озера на сушу. Наиболее сильны ветры западных румбов, к ним относятся горный и сарма, достигающие в порывах силы урагана – 40–50 м/с. Повторяемость и длительность сильных ветров зависят от общих синоптических условий района. Максимальные скорости ветров отмечаются в апреле – мае и ноябре. Волнение на озере наблюдается почти непрерывно и может усиливаться достаточно быстро [Инженерная геология Прибайкалья, 1968; Байкал. Атлас, 1993]. Высота волн зависит от скорости ветра, длительности его действия и разгона – расстояния, на котором ветер продолжает воздействовать на бегущую волну. По схеме районирования прибрежной зоны по гидродинамическим характеристикам наибольшая высота волн наблюдается в проливе Ольхонские Ворота, а также в районе Святого Носа, где она может превышать 3 м.

Озеро Байкал ежегодно полностью замерзает, постепенно с севера на юг, покрываясь льдом. Толщина льда в среднем составляет 1 м. Во многих районах Байкала наблюдается локальное протаивание льда снизу и образование пропарин, размеры которых очень различны – от нескольких метров в поперечнике до сотен метров. Отмечено также более раннее (на 2–3 недели) таяние льда у крутых скалистых западных берегов. Этому способствует запыленность льда частицами грунта и отраженная тепловая радиация от крутых скальных берегов. Весенний взлом льда начинается на юге в конце апреля, завершаясь на севере к середине июня.

Многолетнемерзлые породы в пределах береговой зоны оз. Байкал имеют островное и редкоостровное распространение, температуры которых колеблются от $-0,1$ °С до -1 °С. Мощность многолетнемерзлых грунтов на побережье в области редких островов многолетнемерзлых пород редко достигает 15 м, а в области островного распространения она увеличивается до 80–100 м. В геокриологическом отношении это территория глубокого сезонного промерзания, мощность которого меняется в литологических разностях, в среднем составляет 2,0–2,5 м. Промерзание грунтов начинается в первой половине ноября, протаивание фиксируется во второй половине марта. Период промерзания–протаивания составляет 4,5 месяца [Светлаков, 2018]. В долинах рек и на заболоченных территориях возможно формирование перелетков и новообразований мерзлых толщ. Среди преобладающих геокриологических процессов

наиболее часто встречаются пучение, морозное растрескивание, термокарст, наледи [Экологический атлас бассейна озера Байкал, 2015].

Геоморфологические и структурно-геологические условия

Озеро Байкал является одним из самых древнейших озер мира. Оно существует около 25 млн лет, и не отмечаются признаки старения озера. По геофизическим данным берега озера расходятся со скоростью до 2 см/год, подобно тому, как расходятся континенты Африки и Южной Америки. Растяжения земной коры, зафиксированные геофизическими исследованиями, легли в основу гипотезы о том, что Байкал является зарождающимся океаном. Впадина Байкала рассматривается как центральное звено Байкальской рифтовой зоны, возникшей и развивающейся одновременно с мировой рифтовой системой [Флоренсов, 1978]. Впадина чуть шире современной озерной котловины, но гораздо глубже ее – корни впадины уходят в верхнюю мантию, т.е. на глубину 50–60 км [Байкал. Атлас, 1993]. Байкальская впадина – самая крупная в структуре внутриконтинентальной Байкальской рифтовой системы среди впадин байкальского типа. Она ограничена разломами и представляет собой грабен, где погружение фундамента максимально у северо-западного борта, более крутого, чем южный, и юго-западного борта. Самые крупные разломы – Главный Саянский и Приморский – имеют древнее докайнозойское заложение и были активизированы в кайнозое. Разломы представляют собой ветви глубинного краевого шва, разделяющего Сибирскую платформу и Саяно-Байкальскую складчатую область [Шерман, Леви, 1978; Парфеевец, Саньков, 2006]. Неотектонические движения крупных структурных блоков Сибирской платформы и Саяно-Байкальской горной области предопределили геоморфологический облик современной котловины озера Байкал и ее береговых склонов. Интенсивное опускание днища впадины в процессе рифтогенеза обусловило развитие крутых высоких береговых склонов. Надводные и подводные части склонов имеют единое, преимущественно сбросово-тектоническое происхождение, осложнено развитием экзогенных геологических процессов. Склоны на значительных протяжениях прямолинейны, так как в основном заложены по плоскостям разломов, глубоко расчленены тектоническими и эрозийными долинами, находятся в условиях преимущественной денудации [Агафонов, 2004].

Озеро Байкал принадлежит к водоемам горного типа, находится на высоте 455,5 м над уровнем моря. Со всех сторон окружено горными хребтами. Горные хребты, кряжи, межгорные и внутригорные впадины создают сложнопостроенный рельеф и имеют выраженное северо-восточное простирание. Несколько хребтов, прилегающих к Байкальской впадине, по своему типу приближаются к высокогорным – Баргузинский

(2840 м), Байкальский (2572 м), Северо-Муйский (2561 м), западная часть Хамар-Дабана (2758 м). Большие площади заняты средневысокими хребтами, особенно в средней части впадины, – Приморский, Цаган-Дабан, восточная часть Хамар-Дабана и другие, высоты которых 1200–2000 м. На некоторых участках берега водораздельная линия удалена от уреза воды по прямой всего на 2–3 км, потому зрительный контраст высот тут очень велик [Лут, 1978]. Более половины (55 %) байкальских склонов имеют уклон круче 15° , свыше 33 % склонов круче 25° и только 26 % территории приходится на склоны менее 10° [Пармузин, 1975].

Активная неотектоническая подвижность глубинных разломов, бортов грабена Байкальской впадины обусловила высокую сейсмичность этого региона. Впадина озера является центральным звеном Байкальской рифтовой зоны, испытывающей активные сеймотектонические подвижки. Территория Байкальской рифтовой зоны относится к области частых и интенсивных землетрясений силой до 8–10 баллов и выше (рис. 3.2). В зонах сильных землетрясений происходят вертикальные и горизонтальные смещения блоков с амплитудой до 7–8 м. Тектонические движения земной коры при сильных землетрясениях охватывают площадь в сотни тысяч км² [Солоненко, 1972].

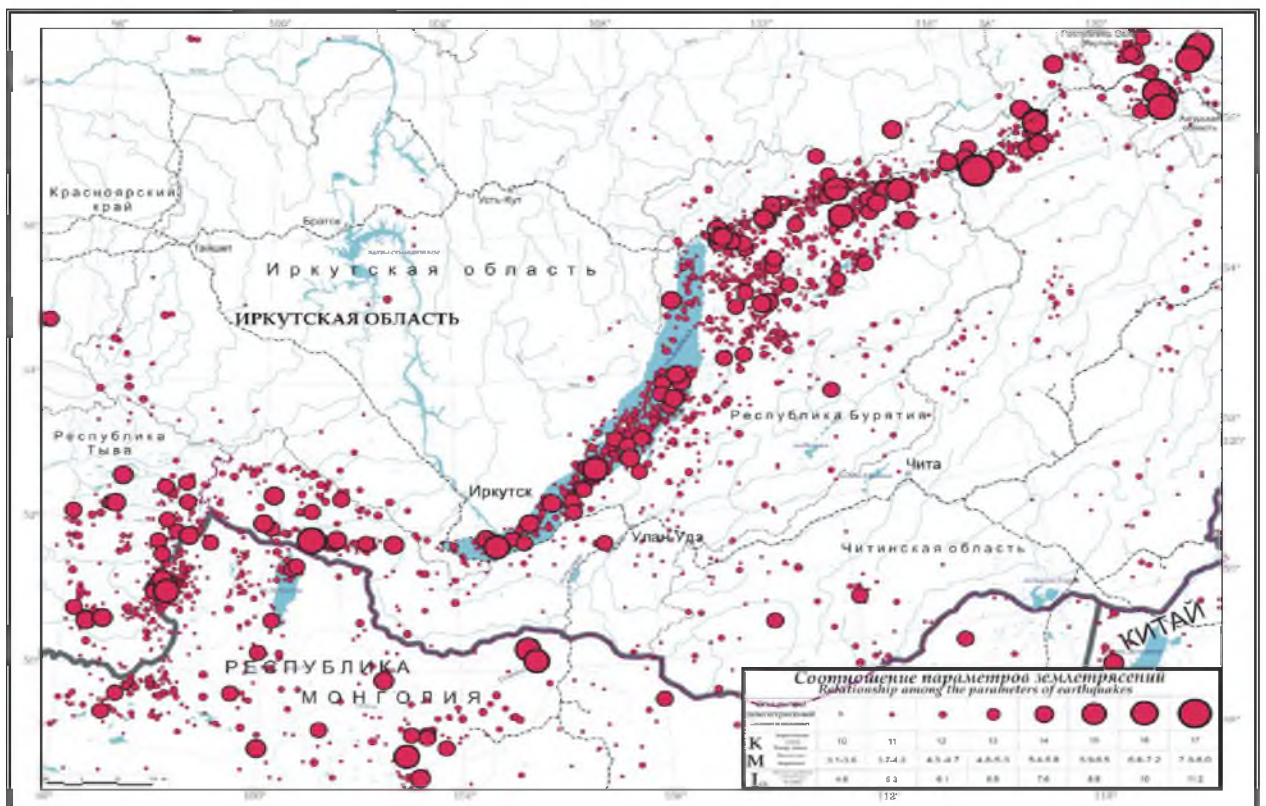


Рисунок 3.2. Карта эпицентров землетрясений БРЗ (по данным Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН).

В геологическом строении береговой зоны Байкала участвуют магматические, метаморфические и осадочные породы от архея до четвертичного возраста включительно (рис. 1.2., Глава 1). По периметру береговой линии озера Байкал преобладают трещиноватые, сильновыветрелые породы, рыхлые и слаболитифицированные отложения занимают меньшие по площади территории.

Группа метаморфических пород

Высокометаморфизованные породы архейского и протерозойского возраста (архей, неопротерозой, венд – ранний палеозой) представлены биотитовыми, амфиболовыми и амфибол-биотитовыми гнейсами и кристаллическими сланцами с горизонтами и линзами кварцитов, амфиболитов, мраморов и кальцифиров. Гнейсы и сланцы, будучи породами механически анизотропными, обладают прочностью, вдоль сланцеватости значительно меньшей, чем поперек сланцеватости. По степени устойчивости к процессам выветривания породы этой формации можно расположить в следующем порядке: кварциты, мигматиты, гнейсы, сланцы, мраморы. Процессы их выветривания проявляются в основном в распаде на отдельные глыбы, обломки, щебенку. Мощность коры выветривания в зависимости от характера пород и положения в рельефе изменяется от 0,5 до 20 м [Инженерная геология Прибайкалья, 1968; Байкаловедение, 2012].

Слабометаморфизованные породы палеопротерозойского комплекса представлены известняками и доломитами, чередующимися с аргиллитами, алевролитами, филлитами и песчаниками (терригенно-карбонатная формация). Региональный метаморфизм отложений проявлен слабо. Конгломераты – зеленовато-серые, массивные, иногда слаборассланцованные породы, состоящие из хорошо окатанной различного размера гальки местных подстилающих пород и кварца. Цемент песчанистый полимиктовый составляет от 5 до 50 % объема породы. Степень цементации пород очень высокая.

Известняки и доломиты – светло-серые, кремовые или темно-серые, мелко- и среднезернистые, реже пелитоморфные, местами окремнелые, массивной или слоистой, иногда брекчиевидной и кавернозно-пористой текстуры. Аргиллиты, алевролиты и глинистые сланцы – темно-серые и зеленовато-серые, в различной мере филлитизированные, тонкослоистые и сланцевые. Наиболее высокой прочностью из них обладают глинистые сланцы. Породы сравнительно слабо противостоят выветриванию и редко образуют скальные обнажения. Наиболее устойчивы к процессам выветривания конгломераты и песчаники, особенно их кварцевые разности. Менее устойчивы – аргиллиты, алевролиты и сланцы, к которым обычно приурочены отрицательные формы рельефа. При выветривании песчаников и известняков образуются грубоплитчатые

обломки, а алевролитов и сланцев — тонкоплитчатые обломки и мелкий остроугольный щебень [Инженерная геология Прибайкалья, 1968; Инженерная геология СССР, 1977; Байкаловедение, 2012].

Группа магматических пород

Магматические породы на описываемой территории распространены широко. Среди них известны магматические комплексы палеопротерозойского, раннепалеозойского и позднепалеозойского возраста. По составу среди них выделяются породы от ультраосновных до ультракислых, а также разности щелочного и щелочно-земельного ряда, но при этом более всего распространены граниты. Генетические особенности гранитоидов определяют их физико-механические свойства и поведение в зоне выветривания. В соответствии с этим выделяются две формации гранитоидов (гранитогнейсовая ультраметаморфическая и батолитовая).

Гранитогнейсовая ультраметаморфическая формация нижнего протерозоя представлена гранитогнейсами, очковыми гнейсогранитами, пегматитами и аляскитовыми гранитами. Состав пород изменяется в зависимости от состава вмещающих пород — от диоритового до аляскитового. Среди пород архея и нижнего протерозоя граниты образуют согласные линзо- и плитообразные тела самых различных размеров, густо пронизывающие вмещающие породы. Почти повсеместно в гранитах отчетливо видна реликтовая слоистость (полосчатость), повторяющая складчатые формы вмещающих пород. Гранитогнейсы в общей своей массе относятся к прочным и устойчивым к выветриванию породам. Однако гнейсовидная текстура, обусловленная линейным расположением минералов (прежде всего слюды), снижает устойчивость пород в массиве, в особенности в зоне выветривания.

Батолитовая формация представлена интрузивными комплексами гранитоидов протерозойского, палеозойского возраста. По составу среди этих формаций выделяется много разновидностей пород: граниты, гранодиориты, граносиениты, сиениты, диориты и ряд других, причем биотитовые и биотитово-роговообманковые граниты резко преобладают. Это преимущественно средне- и крупнозернистые, местами порфириовидные породы розовато- или желтовато-серого цвета, полнокристаллической гранитной структуры. Для них типично массивное, однородное сложение. Выветривание гранитов и гранитогнейсов происходит сравнительно быстро. При их разрушении образуются россыпи крупных обломков более или менее сглаженной формы. В отдельных случаях гранитоиды разрушаются сразу на дресву и песок. Мощность элювия обычно 1,5 – 2,0 м, но местами 4 – 5 м и более [Инженерная геология СССР, 1977; Байкаловедение, 2012].

Группа кайнозойских и мезозойских осадочных пород

Угленосная формация слагает узкую предгорную равнину вдоль юго-восточного побережья Байкала и представлена переслаиванием песков (песчаников), алевролитов, глин и углей с редкими прослоями и линзами гравелитов и мергелей. Цементация песчаных и крупнообломочных пород очень слаба или отсутствует вовсе. Мощность отложений от нескольких десятков до 1200 м. Залегают они на древней коре выветривания и перекрыты маломощным (2—4 м) покровом четвертичных озерных галечников. В целом в составе формации наиболее распространены песчаные породы. Пески кварцевые и кварц-полевошпатовые, в преобладающей массе мелкозернистые, глинистые, с примесью слюды. Угли в составе формации бурые. Они представляют собой породы слабой крепости, в большей или меньшей степени разбитые трещинами. Мощность пластов угля от 0,3 до 5,0 м. Основная масса глинистых пород по гранулометрическому составу относится к алевролитам, содержание в которых глинистой фракции 15—26 %, алевролитовой — 50—60 %, песчаной — 13—29 %. Все разновидности глинистых пород сильно уплотнены, в невыветрелом состоянии отличаются значительной твердостью, большим сопротивлением сдвигу, слабо размокают и с трудом поддаются разрыхлению и смыву при производстве гидромониторных работ. Глинистые породы слабо устойчивы к процессам выветривания. Свежесрезанные откосы, сложенные глинами, уже через 1—2 года оказываются разрушенными на глубину 0,9—1,2 м, а через 2—3 года — на глубину сезонного промерзания (до 2,5 м). В образовавшемся слое элювия интенсивно развиваются сплывы.

Красноцветная формация плиоцена выходит на дневную поверхность по юго-восточному побережью Байкала. Ведущую роль в строении формации играют галечники, конгломераты, гравелистые пески и песчаники. Обычно это массивные плотного сложения породы с плохо выраженной слоистостью. В отдельных местах прочно скрепленные песчано-железистым цементом галечники (конгломераты) в обнажениях образуют вертикальные стенки высотой до 10—15 м [Инженерная геология СССР, 1977].

Краевые части Байкальской впадины заполнены разными генетическими отложениями четвертичного возраста: озерными, пролювиальными и ледниковыми. Значительная роль в истории развития береговой зоны Байкала принадлежит изменениям положения уровня водоема, вызванным неотектоническими движениями и связанными с ними трансгрессиями, а также проявлением циклических и ритмических его колебаний в ледниковые и межледниковые периоды. Рядом авторов опубликованы модели неотектонических периодов движения блоков Байкальского рифта и эпох накопления осадочного материала в пределах котловины и бортов озера Байкал [Мац, 2012; Леви и

др., 2015]. Исследования палеогеографической обстановки озера показали наличие разноуровневых байкальских террас, формирование которых происходило в четвертичное время при разных положениях уровня воды в водоеме [Черский, 1880; Ладохин, 1958]. Положение уровня воды в озере находилось ниже современных отметок на несколько метров [Лут, 1964; Инженерная геология Прибайкалья, 1968], о чем свидетельствуют подводные террасированные поверхности – «подводные террасы» [Хлыстов и др., 2008; Кононов, 2010]. На берегах озера Байкал описаны комплексы озерных отложений: низкие (I–IV) и высокие (выше IV) террасы [Ламакин, 1968; Мац, Ефимова, 2015]. Наличие достоверно установленных подводных и надводных байкальских озерных террас свидетельствует о положении уровня воды в котловине озера на разных гипсометрических отметках в течение продолжительного времени, что позволило сформировать озерные комплексы и выработать определенный профиль берегового склона, адаптированного к периодически меняющемуся положению уровня. Байкальские берега в палеогеографическом прошлом много раз испытывали перестройку морфологии профиля берегового склона, вырабатывая новый профиль берегового склона под изменение уровня воды в котловине и тем самым формируя определенную устойчивость берегового склона к ветроволновым нагрузкам.

За почти 70-летний период инструментальных наблюдений озера в естественных условиях уровень озера с весны до осени повышался, с поздней осени до весны понижался. Минимальные положения уровней в 98 % случаев приходились на апрель, максимальное положение уровня оз. Байкал приходилось на декабрь. За период естественного режима озера максимум уровня наблюдался в 1932 г. и достигал абс. отм. в 456,8 м, а минимум – в 1904 г. (454,83 м). Амплитуда многолетних колебаний уровня достигала 1,97 м (рис. 3.3).

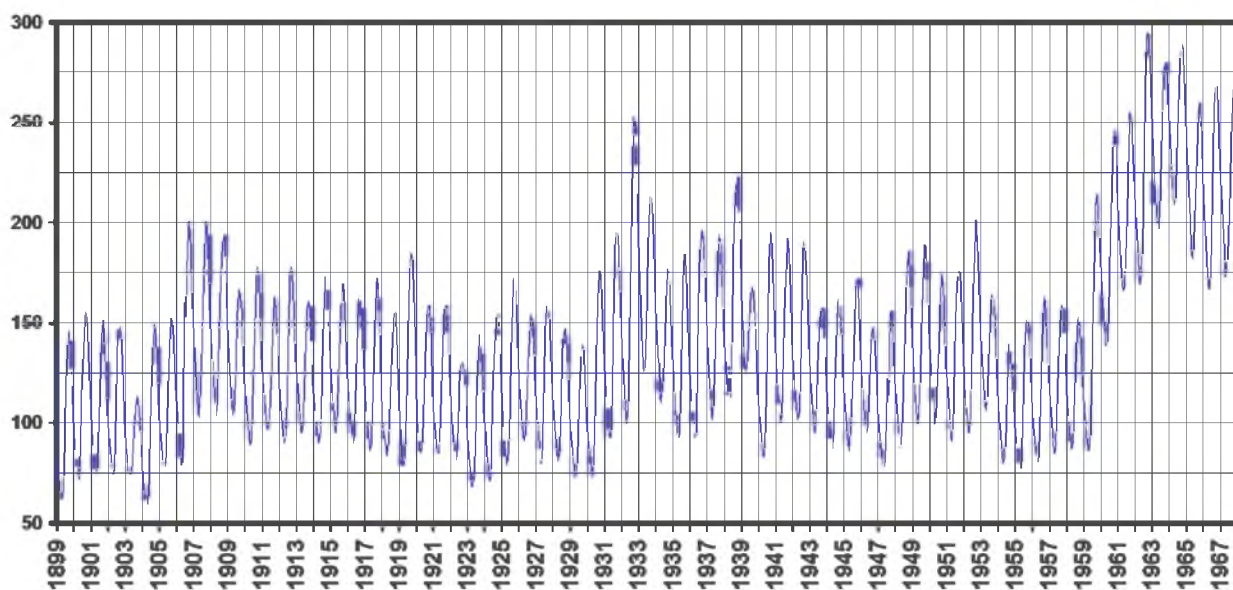


Рисунок 3.3. Колебание уровня воды оз. Байкал в период 1899–1967 гг. (в Балтийской системе высот, превышения в см.) (обобщение исторических данных из разных источников; данные Гидрометеорологической службы).

Техническое повышение уровня воды в озере и его регулирование

Главным и масштабным фактором, оказывающим значительное влияние на природную среду озера, стало включение котловины озера Байкал в Байкало-Ангарский гидроэнергетический узел водоемов. По классификации водных объектов Ю.М. Матарзина и Т.П. Девяткиной озеро Байкал относится к естественным водоемам с зарегулированным режимом [Матарзин, 2003], и с 1961 года положение уровня воды в озере и его колебания зависят от технического регулирования на фоне природно-климатических особенностей естественного формирования водного баланса озера.

После создания Иркутского гидроузла произошло объединение резервуаров озера и долинного водохранилища в единый водный объект, что привело к искусственному повышению уровня воды в озере Байкал на 1,2 м и накоплению значительного объема водной массы в озере с единым водным зеркалом Иркутского водохранилища. После технического повышения уровня воды в озере вслед за наполнением Иркутского водохранилища амплитуда годовых колебаний уровня уменьшилась, но в многолетнем цикле – увеличилась. Максимальные отметки уровня воды на Байкале при техническом регулировании достигаются в осенний период (сентябрь – октябрь), когда наступает штормовой период на озере (рис. 3.4). Минимальные уровни в озере после зимней сработки воды характерны для весеннего периода.

В отдельные периоды уровень воды при техническом регулировании его положения достигал самых высоких отметок за последние 200 лет наблюдений (1962–

1963, 1973–1974, 1988–1989 гг.). Реакция берегов озера на повышение уровня незамедлительная, отмечается активизация абразионного процесса. Временные снижения уровня (1971–1972 и 1975–1982 гг.) приостанавливали активную абразию берегов, ее интенсивность снижалась на этот период. Однако все береговые экзогенные процессы ритмично активизируются в периоды очередного подъема уровня, достигая максимальных значений при высоких положениях уровня, превышающих НПП на 0,2–0,3 м, особенно осенью во время штормов и ветроволнового нагона [Иметхенов, 1987].

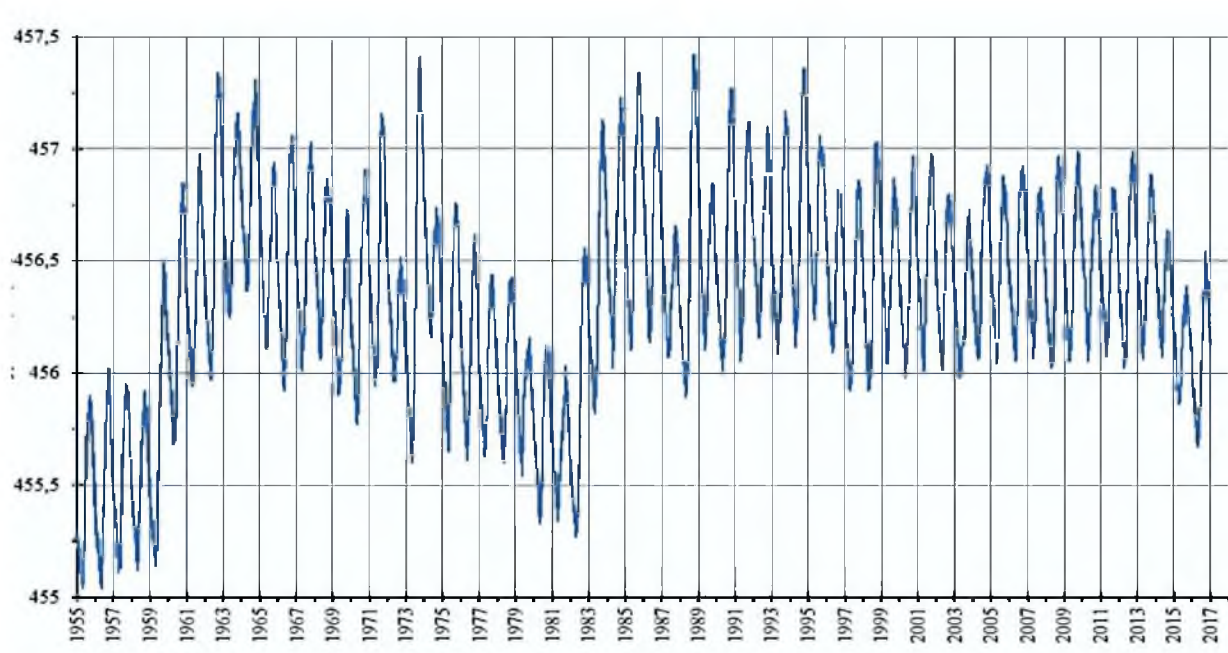


Рисунок 3.4. Колебание уровня воды оз. Байкал в период 1955–2017 гг. (в Тихоокеанской системе высот (м), по данным Гидрометеорологической службы).

В марте 2001 г., после принятия постановления Правительства Российской Федерации, отметки уровня были установлены в пределах 1 м (мин. 456 м, макс. 457 м). Как показали результаты натурных наблюдений, выполняемых в период с 2001 по 2014 г. в пределах береговой зоны на ключевых участках, установленные ограничения по амплитуде колебания уровня озера привели к определенной стабилизации абразионного процесса [Козырева и др., 2011, 2014].

В 2014 г. природно-климатические аномалии, маловодность нескольких лет привели к понижению уровня воды в Байкале до критических отметок (рис. 3.5). В соответствии со статьей 7 Федерального закона «Об охране озера Байкал» Правительство Российской Федерации постановило:

1. Установить в 2016–2017 гг.:

– максимальное и минимальное значения уровня воды в озере Байкал в период средней водности на отметках соответственно 457 и 456 м (в ТО системе высот);

– минимальное значение уровня воды в озере Байкал в период малой водности (маловодный период) на отметке 455,54 м (в ТО системе высот);

– максимальное значение уровня воды в озере Байкал в период большой водности (многоводный период) на отметке 457,85 м (в ТО системе высот).

2. Приостановить до 1 января 2018 года действие Постановления Правительства Российской Федерации от 26 марта 2001 года № 234 «О предельных значениях уровня воды в озере Байкал при осуществлении хозяйственной и иной деятельности» (Собрание законодательства Российской Федерации, 2001, № 14, ст. 1366).

3. Продлить до 2020 г. дифференцированные максимальный и минимальные уровни озера Байкал в зависимости от условий водности – нормальной, экстремально высокой и экстремально низкой (Постановление № 1667, 23 декабря 2017 года).

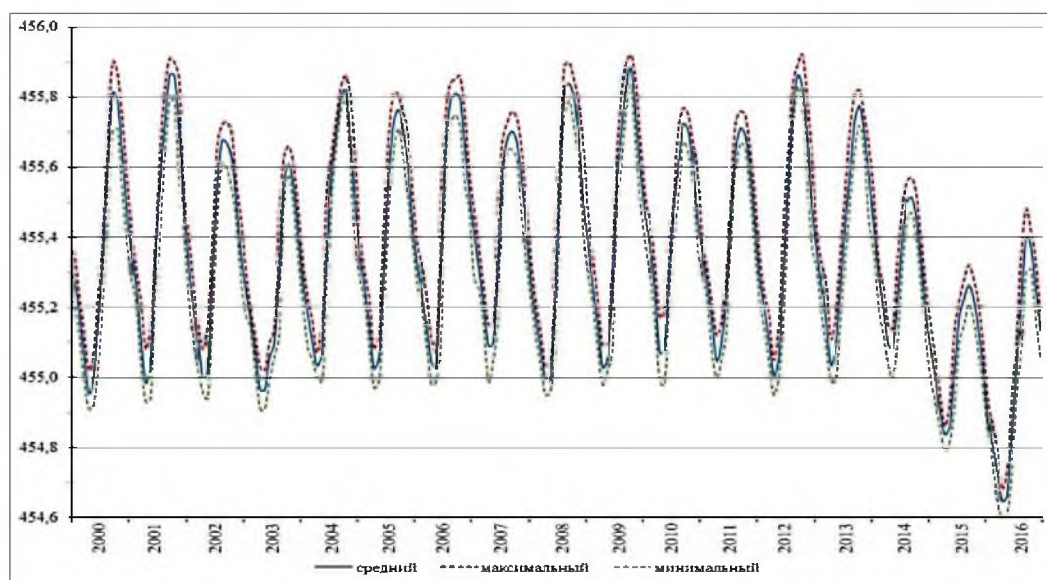


Рисунок 3.5. Колебание уровня воды оз. Байкал в период 2000–2017 гг. (в Тихоокеанской системе высот (м), по данным Гидрометеорологической службы).

В ходе технического повышения уровня воды в озере и многолетней эксплуатации выделяется несколько периодов:

1959–1964 гг. – период наполнения и повышения уровня относительно его естественного положения в озере;

1964–1974 гг. – первый период эксплуатации с нестабильным положением уровня воды;

1974–1982 гг. – период с многолетним снижением уровня в озере;

1982–1995 гг. – период эксплуатации со значительной амплитудой (2,9 м) колебания уровня воды в озере;

1995–2014 гг. – период стабильной эксплуатации с амплитудой колебания 1 м;

С 2014 года – низкие положения уровня воды в водоеме.

Изменение диапазона возможных колебаний уровня воды в течение года с 2016 года превышает естественный годовой ход уровня в озере в сторону увеличения и возвращает к амплитудам годовых колебаний эксплуатационных периодов 1966–1974 и 1982–1995 гг. Наполнение озера до максимальных отметок (выше 457 м) вернет береговые склоны в неустойчивое состояние и возобновит процессы формирования профиля равновесия, соответствующего новым условиям положения уровня.

3.2. Экзогенные геологические процессы, формирующие генетические типы и подтипы байкальских берегов

Современные экзогенные геологические процессы вызывают наиболее ощутимые изменения в очертаниях береговой линии и морфометрических характеристик надводных и подводных частей берегового склона. В пределах байкальских берегов современную морфологию береговых зон определяют такие процессы, как абразия, аккумуляция, оползни, обвалы, ветровой перенос песков и др. [Агафонов, 1990; Агафонов, Акулов, 2006; Тржцинский и др., 2007].

Большинством исследователей при изучении берегов крупных водоемов принято использовать ранжирование, группировки с выделением условно однородных территориальных единиц в целях оценки современного состояния берегов и понимания механизма их формирования. Известны работы по классификации морских берегов и берегов водохранилищ, расположенных в различных природно-климатических условиях, в основе которых лежит генетический подход: В.П. Зенковича, О.К. Леонтьева, М.Н. Григорьева, Л.А. Жиндарева, И.А. Печеркина, Ю.М. Матарзина, Е.К. Гречищева, П.Ф. Бровко, В.И. Лымарева и др. Классификация берегов включает в себя систематизацию и оценку характера развития береговых процессов. Формирование морских берегов, берегов озер и искусственных водоемов – результат сложных взаимодействий водной составляющей и вмещающих горных пород; результирующими в развитии берега становятся две группы процессов: абразия и аккумуляция. Общие закономерности в создании берегов предопределяются как раз развитием этих двух групп процессов, а их взаимодействие с другими экзогенными процессами в береговой зоне формирует различные подтипы берега с абразионной или аккумулятивной составляющей.

Анализ развития ЭГП в береговой зоне, уточнение характеристик распространения основных типов и подтипов берегов в современных условиях при сложившихся к настоящему времени техногенных нагрузках являются актуальными в связи с необходимостью понимания эволюционных преобразований геологической среды.

В современных условиях, после периода длительной технической эксплуатации водоема, на озере Байкал по–прежнему развиваются две основные генетические группы берегов – абразионные и аккумулятивные, подразделяясь на основные типы и подтипы. Аккумулятивная и абразионная генетические группы представлены в сочетании с сопутствующими экзогенными процессами. Помимо основных абразионных и аккумулятивных типов берегов на ограниченном протяжении береговой линии озера Байкал развитие получили техногенные (укрепленные) берега.

Абразионная группа

Структурно-абразионный тип берега характерен для побережья, где выражены геоструктурные элементы: зоны разломов, плоскости смещения, синклинальные и антиклинальные складки. Структурно-геологическая история возникновения байкальских склонов служит основой выделения структурно-абразионного типа в совокупности с показателями высокой физико-механической прочности слагающих берег пород. Структурно-абразионный тип берега представлен в основном кристаллическими и метаморфическими горными породами (скальными грунтами), весьма устойчивыми к разрушающему воздействию волн и агентам выветривания. По классификации Ю.Д. Шуйского и Г.А. Семионовой по степени сопротивляемости абразии кристаллические сланцы, мрамора, гнейсы раннепротерозойского возраста, слагающие байкальские берега, относятся к I–II классу с возможной скоростью абразии клифа до 1 см/год [Шуйский, 1986]. Данный тип берегов практически не размываем. Структурно-абразионные берега распространены по основной акватории, мысовым частям, продолжая в общем плане черты регионального структурно-тектонического рисунка, пространственно совпадая с зонами разломов и разрывов, оконтуривших борта Байкальской впадины [Динамика берегов..., 1976; Рогозин, 1993].

Структурно-абразионный берег представляет собой крутые, субвертикальные клифы, достигающие высоты 190 м. В зоне воздействия волн ведущая роль в разрушении коренных пород отводится механической работе волнения и физико-химическому выветриванию. В рельефе склона это проявляется образованием волноприбойных ниш, гротов, козырьков и других отрицательных форм в береговой зоне.

При анализе динамики берегов на участках развития данного типа берега не выявлено сколько-нибудь заметного отступления бровки. При дешифрировании аэрофотоматериалов разных лет (1953 – до наполнения, 1984 – эксплуатационный период) для территории побережья Байкала, где распространены структурно-абразионные берега, и при сопоставлении их с космоснимками 2000-х годов установлено, что

положение бровки склонов не изменилось. Роль волнения вдоль береговой линии сводится к выносу из волноприбойной зоны продуктов выветривания горных пород [Рогозин, 1993] и их сносу [Агафонов, 2004]. В результате анализа аэрофотоматериалов разных лет видно, что и сам береговой склон практически не изменил своего положения, оставаясь в прежних параметрах. Локальное обрушение пород возможно по плоскостям напластования и тектоническим трещинам. В пределах структурно-абразионных берегов на отдельных его участках отмечается возникновение обвалов и вывалов. Единичные, локальные события обвалов и вывалов могут снять возникшие напряжения и перераспределение сил внутри массива горных пород, однако это не приведет к изменению элементов профиля берега и переходу в другой тип побережья. В профиле склона зачастую отсутствует пляж. От уреза начинается небольшая прислоненная аккумулятивная терраса, и практически сразу идет значительное увеличение глубины подводного берегового склона. Подводный береговой склон не только сохраняет крутизну надводной части, но и нередко превышает ее, что объясняется его относительной молодостью и меньшей преобразованностью эрозионно-денудационными процессами под водой. В пределах крутых байкальских склонов существуют предпосылки интенсивного развития подводных процессов, сноса материала на глубину. Склоны, находясь в пограничном состоянии непрерывного опускания дна рифтовой впадины, остаются крутыми и обрывистыми [Агафонов, 2004].

Хорошо выраженный структурно-абразионный тип берега представлен в пределах полуострова Святой Нос. Участок «Святой Нос» представляет собой крутой склон с узким пляжем. Общий уклон надводного склона $40\text{--}43^\circ$ (рис. 3.6). Склон сложен породами метаморфической формации венд-раннепалеозойского возраста и позднепалеозойскими гранитоидами магматической формации, представленной гнейсами, кристаллосланцами и мраморами. Текстура горных пород пятнистая, структура гипидиоморфно-зернистая, метасоматическая, коррозионная. Основной минеральный состав: 25 % – амфибол; 35 % – микроклин; 20 % – плагиоклаз*.

На участке преобладают процессы выветривания. Из-за сланцеватой структуры гнейсы подвержены выветриванию и легко раскалываются вдоль сланцеватых плоскостей.

* *Определение минерального состава коренных горных пород выполнено в лаборатории геологии и магматизма древних платформ ИЗК СО РАН.*

Сформирована зона выветрелых горных пород. По данным наблюдений М.Д. Будза и Ю.Б. Тржцинского для района Прибайкалья, средняя скорость выветривания мелкозернистых серых гранитов составляет 0,11 год, крупнозернистых серых гранитов – 0,3–0,4, гнейсов – 0,6, кристаллических сланцев – 0,6–1,0, мраморов – 0,7, аргиллитов – 1,2–1,4 и известняков – 2,1 см/год [Инженерная геология Прибайкалья, 1968]. Пляж представлен валунно-галечным материалом (размером до 10 см). Максимальная высота волнения на участке достигает 3 м (по карте гидродинамических характеристик) [Байкал. Атлас, 1993].

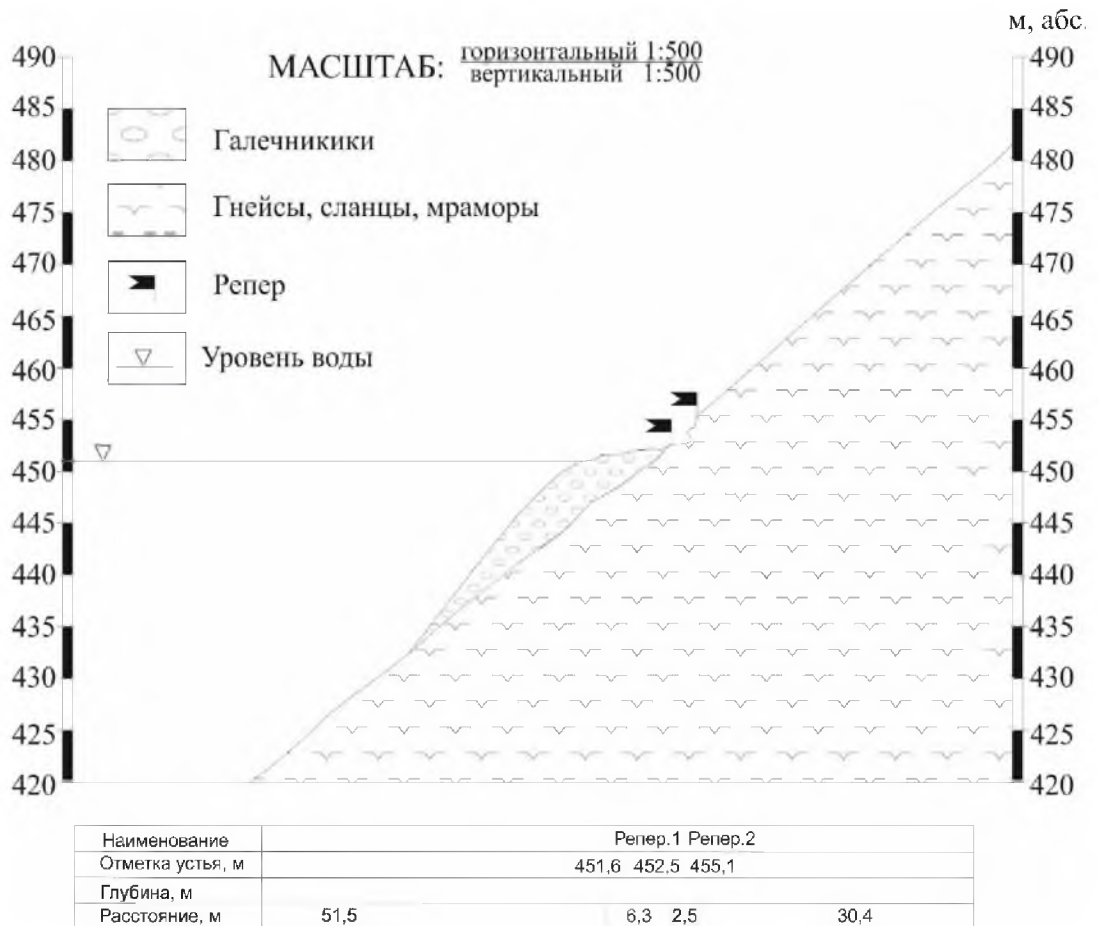


Рисунок 3.6. Профиль берегового склона ключевого участка Святой Нос.

Структурно-абразионный тип берега широко развит на юго-западном побережье: протягивается от м. Лиственничный с небольшими пропусками до м. Голый (рис. 3.7).



Рисунок 3.7. Структурно-абразионный тип берега (юго-западный и северо-западный берег Байкала).

Разрывы структурного берега вызваны врезами долин по ослабленным зонам трещиноватости, подходящим под углом к побережью. Например, бухта Песчаная является в своем роде таким разрывом в структурно-абразионном берегу. Гранит в бухте Песчаной глубоко и неравномерно выветрен, это древняя кора выветривания, срезанная берегом Байкала в прошлые эпохи. «Карманы и ниши кор выветривания» приурочены к системам сближенных трещин [Флоренсов, 1964]. Текстура коренных горных пород массивная, структура гипидиоморфно-зернистая, микропертитовая. Минеральный состав представлен на 85 % микроклин-микропертитом* (рис. 3.8).



Рисунок 3.8. Бухта Песчаная (А), образец коренного гранита (Б).

Высокие склоны далее на север сменяются более низкими склонами до пролива Ольхонские ворота. На всем протяжении они коррелируются с региональным направлением разломной тектоники. На острове Ольхон структурно-абразионный берег выделен по восточному побережью, в северной части от мыса Шутнэ-Правый до Соган-Хушин и в мысовых частях западного побережья. Севернее мыса Ижимей глубина озера составляет 1637 м.

* Определение минерального состава коренных горных пород выполнено в лаборатории геологии и магматизма древних платформ ИЗК СО РАН.

Структурно-абразионный тип берега predetermined структурно-тектоническим строением побережья, и элементы разломной тектоники маркируют данный тип берега. Берега сложены глубокометаморфизованными силикатно-карбонатными породами: кристаллическими известняками с графитом, гнейсами, кварцитами, амфиболитами, мраморами и породами кислого состава – гранитами, сиенитами и пегматитами [Козырева и др., 2014]. Структурно-абразионный тип берега встречается на отдельных участках восточного побережья Байкала, сложенного гнейсогранитами, гранитогнейсами и гранодиоритами архея.

На западном склоне оз. Байкал структурно-абразионный склон представлен на участке «Хайрем», расположенном в пределах южного кордона Байкало-Ленского заповедника. Горные породы в склоне представлены кварц-эпидот-амфиболовыми сланцами. Текстура сланцево-полосчатая. Основной минеральный состав: 53 % – амфибол, 10 % – эпидот, 15 % – кварц и рудные минералы *. Общий уклон склона 60–65°. Пляжевая зона сложена валунно-галечными отложениями шириной 9,6 м. Прислоненная аккумулятивная терраса незначительных размеров, и на расстоянии 12 м от уреза профиль погружается на глубину 15 м. Береговая зона сложена валунным материалом (рис. 3.9).

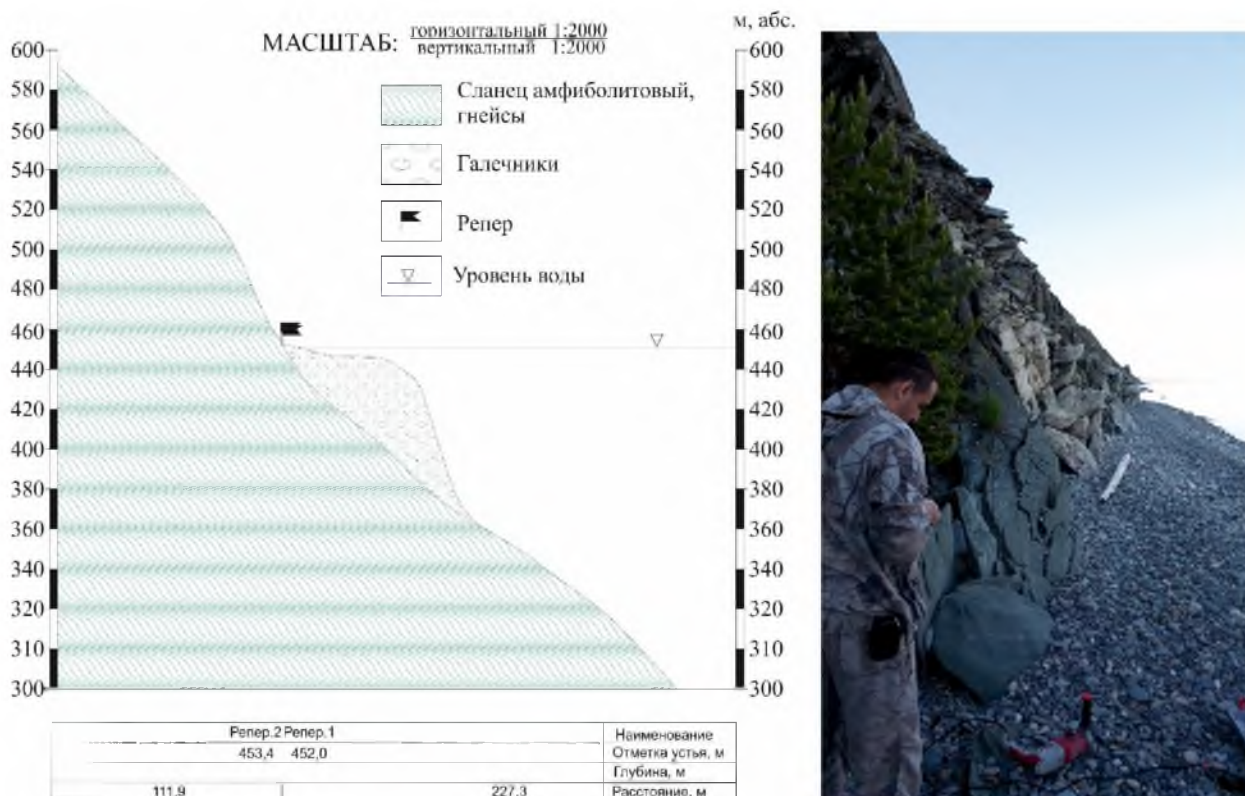


Рисунок 3.9. Профиль берегового склона ключевого участка Хайрем (фото 2017 г.).

* Определение минерального состава коренных горных пород выполнено в лаборатории геологии и магматизма древних платформ ИЗК СО РАН.

В целом, повышение уровня и эксплуатационный период водоема не оказали на берега структурно-абразионного типа заметного влияния. Нужно отметить, что и освоение этих берегов затруднено в силу значительных уклонов побережья и отсутствия пляжей. При крутизне $40\text{--}50^\circ$ надводные склоны находятся в условиях преимущественной денудации, а их аналоги (продолжение склона) под водой обнажены в силу постоянного сноса продуктов выветривания и оголения подводных склонов [Агафонов, 2004].

Абразионный тип берега на Байкале распространен широко, и виды проявления экзогенных геологических процессов на береговых склонах в пределах данного типа берега разнообразны.

«Абрадирумье» (по Б.П. Агафонову [2004]) уступы развиваются в аккумулятивных шлейфах и террасах, комплексах озерно-речных террас, делювиально-пролювиальных и моренных равнинах у подножья гор; размыв чехла рыхлых отложений происходит в пределах абразионных берегов. Общими чертами при выделении абразионного типа берега является наличие абразионного уступа (клифа), следов деформаций в пределах надводного склона, развитие экзогенных процессов в пределах бровки уступа, пляжа и надводного берегового склона, приглубый подводный береговой склон, широкая и нарастающая прислоненная аккумулятивная терраса, присутствие вторичных уступов на осушенном склоне. Все перечисленные элементы абразионной деятельности свидетельствуют о развитии берега с абразионной компонентой в пределах абразионного типа берега.

В северной части озера вдоль Байкальского и Баргузинского хребтов по западному и восточному побережью абразионные берега развиваются в отложениях предгорных шлейфов, сложенных супесчано-глибовыми отложениями осыпей, курумов, сплывов, делювиальных покровов, а также моренных комплексов (рис. 3.10).



Рисунок 3.10. Абразионный тип берега (восточный склон Байкала).

Мощность супесчано-глыбовых отложений в абразионном клифе достигает 10–12 м. Абразионный клиф, как правило, отвесный. Ширина пляжа достигает 10 м. В пляжевой зоне отмечаются следы вторичных уступов. Размываемый материал, поступивший в волноприбойную зону с абразионного клифа (уступа), быстро рассортировывается волнами и вдольбереговыми потоками. Поступивший материал задерживается в прибрежной зоне, где разрушается до состояния дресвы, песка, частичек илистых размерностей. Грубообломочные наносы трансформируются в прибрежной зоне и пополняют песчаные и илистые составляющие продуктов седиментации в Байкале [Агафонов, 2004]. Устойчивость абразионных склонов к размывам обеспечивается шириной подводной аккумулятивной террасы и уклоном отмели, наличием или отсутствием крупноглыбового материала в зоне волноприбоя.

Участок береговой линии оз. Байкал от устья р. Рель до мыса Курла представлен широкими бухтами (губами): Лударской, Богучанской, Слюдянской, Онокочанской. Они отделены друг от друга мысами: Лударь, Красный Яр, Писаный Камень, Тонкий, Слюдянский, Тья. Выступающие мысы сложены протерозойскими коренными породами (граниты, граносиениты, гнейсограниты), характеризуются общим уклоном склонов до 40–45°.

В геолого-геоморфологическом отношении описываемая территория представлена байкальскими террасами неоген-четвертичного возраста. Самая низкая, первая, байкальская терраса высотой 2–4 м встречается в губе Богучанской. В Слюдянской губе обнаружена вторая озерная терраса высотой 5–7 м. В разрезе 5-метровой террасы на южной стороне Слюдянской губы в 2 км от мыса Тонкого обнажаются мелкозернистые пески с примесью мелкого гравия и грубозернистого песка. Ниже залегают галечники, в верхней части существенно песчанистые с прослоями мелкозернистых песков мощностью до 0,4 м и светло-серого средне- и крупнозернистого хорошо промытого песка мощностью до 0,1 м [Геоморфология Северного Прибайкалья и Станового нагорья, 1981]. Отложения аллювиально-озерной террасы в пределах абразионного берегового склона перерабатываются, широко развиты обвальное-осыпные явления. Слабонаклонная равнина Рель-Слюдянского междуречья, имея озерное происхождение, сохранила группу Слюдянских озер. Территория, примыкающая к озеру Байкал и Слюдянским озерам (размеры одного из озер 2,0×2,5 км, глубина до 20 м), интенсивно осваивается в туристическо-рекреационных целях. Песчаные пляжи озер служат местом отдыха горожан из Северобайкальска и являются рекреационной зоной для туристов.

Берега абразионного типа на участке «Максимиха», расположенном в Баргузинском заливе на высоком склоне, сложены коренными породами максимихинской

свиты усть-туркинской серии метаморфических пород архея (амфиболитовые гнейсы, сланцы), перекрытыми озерно-аллювиальными отложениями верхнего плейстоцена [Иметхенов, 1987]. В гранулометрическом составе преобладают крупно- и средне-песчаные фракции (0,50–0,25 мм). Обнаженные озерные отложения при высоких уровнях воды в водоеме размываются, формируют абразионные ниши, нависающие карнизы (рис. 3.11). У основания склона рыхлый материал быстро размывается и сносится вниз по аккумулятивной террасе.

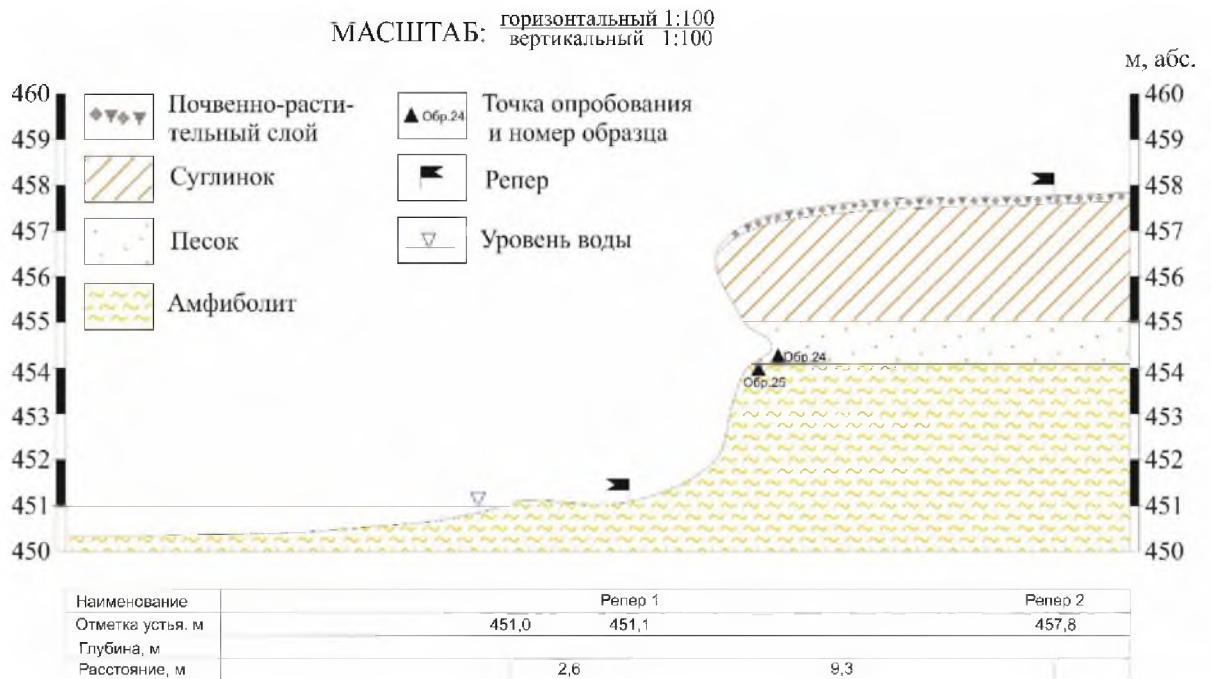


Рисунок 3.11. Профиль берегового склона ключевого участка «Максимиха».

Горные породы в основании уступа сильновыветрелые, трещиноватые. Абразионный уступ вертикальный. Ширина пляжа доходит до 3 м. Приглубый склон, сложенный коренными породами, обнажен, без перекрывающего рыхлого чехла. Уклон подводного берегового склона составляет 8–10°. Береговой склон на данном участке имеет широкую аккумулятивную террасу (рис. 3.12).



Рисунок 3.12. Абразионный склон (участок «Максимиха»).

В районе села Максимиха в связи с особенностями литологического строения отмечаются высокие темпы абразии и отступления бровки берега. По ФЦП «Охрана озера Байкал и социально-экономическое развитие Байкальской природной территории на 2012–2020 годы» в проект заложено финансирование на организацию берегоукрепления – монтаж габионов протяженностью около 250 м и формирование обратной засыпки на участке длиной 84 м.

Участки по юго-восточному склону Байкала (в районе Боярского) сложены неоген-четвертичными отложениями и развиваются по абразионному типу. Переслаивание песков, супесей, суглинков и глин способствует формированию оползней, сплывов и, при высоких положениях уровня воды, интенсивному отступанию и разрушению клифа. В пределах ключевого участка «Боярский» берега развиваются по абразионному типу. Абразионный клиф разрушается в виде нависающих карнизов, происходит сползание растительности и деревьев (рис. 3.13).



Рисунок 3.13. Абразионный склон (участок «Боярский»).

Уклон склона равен 45° , ширина пляжа доходит до 25 м, отмечены элементы вторичных уступов (рис. 3.14). По гранулометрическому составу в пляжевой зоне преобладают крупные песчаные частицы (43,7 %).



Рисунок 3.13. Профиль берегового склона ключевого участка «Боярский».

Исследования берегов, натурные наблюдения, выполненные на восточном побережье Байкала в первый период эксплуатации и высоких уровней, показали, что сильный размыв берегов наблюдается на участках побережья, занятых II (4–6 м) байкальской террасой, сложенной комплексами аллювиальных, аллювиально-озерных, аллювиально-делювиальных и дельтовых отложений песчаного и супесчано-суглинистого состава [Иметхенов, 1987]. Довольно значительный размыв характерен и для I (1,5–3,0 м) террасы Байкала и низких шлейфов, состоящих из суглинков, песков и глин. Слабее подвержены разрушению те уступы террас, у основания которых обнажаются глинистые неогеновые отложения и коренные породы (кристаллические сланцы и гнейсы). В результате абразионной деятельности Байкала, постоянного оползания и оплывания со времени поднятия уровня воды берег разрушался, создавая угрозу целостности полотна железной дороги [Иметхенов, 1994; Хандуева, 2007].

В зависимости от особенностей геолого-литологического строения склона, положения и параметров водосборных бассейнов, локальной морфологии участков побережья, высоты и угла подхода волн, ветровых нагрузок, распределения вдольбереговых течений происходит формирование абразионных берегов при участии экзогенных геологических процессов. В зависимости от развития сопутствующих абразии экзогенных процессов при переработке склона – оползней, обвалов, осыпей, эолового переноса – выделяются подтипы берега, детально представленные ниже.

Абразионно-оползневой подтип

Абразионно-оползневой подтип берега формируется на юго-восточном побережье озера, сложенного комплексом аллювиальных, аллювиально-делювиальных и дельтовых отложений песчаного и супесчано-суглинистого состава, предрасположенных к развитию оползней [Иметхенов, 1987], а также по западному берегу о. Ольхон, где распространены выветрелые горные породы, перекрытые озерными, озерно-делювиальными отложениями.

По западному побережью о. Ольхон береговые склоны поражены оползнями различного типа, и демонстрирующих различный механизм смещения оползневых масс. Встречаются небольшие блочные оползни в скальных породах, сплывы и мелкие оползні-потоки поверхностных рыхлых отложений. В бухтах со значительным чехлом рыхлых отложений формируются более крупные оползни. Активизация спровоцирована абразионной деятельностью в сочетании с особенностями строения грунтового разреза, присутствуют супесчано-глинистые отложения.

Оползень Сарайский (рис. 3.14). Протяженность абразионно-оползневого участка составляет 132 м, захват в глубь склона – на 54 м. Зона смещения приурочена к глинистым отложениям. В верхней части разреза отмечен песок, имеющий эоловый генезис; ниже

залегает песчаная толща байкальских террас – более крупный озерный песок на древней коре выветривания, представленной глинами. Объем оползневого тела, смещающегося по круглоцилиндрической плоскости скольжения, составляет около 200 тыс. м³. Оползневые ступени цирка разрушаются водами озера [Козырева и др., 2011, 2014].



Рисунок 3.14. Сарайский оползень, западное побережье о. Ольхон.

Оползень Саса. В районе мыса Саса оползень поразили деформациями склон высотой около 70 м. Этот крупный оползень сложного типа развивается в аллювиально-делювиальных отложениях неоген-четвертичного возраста, представленных супесчано-глинистым материалом. Мощная толща озерных глин, алевритов, песков, насыщенных железомарганцевыми конкрециями и крупными скоплениями окислов марганца, является в этом районе естественным выходом озерных отложений раннего Байкала [Геологические памятники Байкала, 1993]. Оползневой цирк на участке возник сразу после повышения уровня в озере в результате наполнения Иркутского водохранилища. При дешифрировании аэрофотоснимков 1958 г., сделанных непосредственно после первых катастрофических подвижек, четко видна первая оползневая ступень, сместившаяся с растущим лесом и рыбацкими постройками. Долгое время на протяжении периода эксплуатации оползень прирастал новыми ступенями и обновлял свой контур и оползневые формы. К настоящему времени цепочка оползневых цирков имеет протяженность 380–400 м и регрессивно захватывает склон на 340 м вглубь. Оползневые цирки четко разделены межоползневыми гребнями и бровками срыва. Объем смещающихся горных масс оползня Саса составляет около 3 млн м³. Эхолотированием подводной части склона на глубине 1,2–1,4 м в 50 м от уреза зафиксирован вал выпирания

высотой до 0,5 м, протягивающийся параллельно склону. По трем профилям эхолотирования выделены площадные контуры оползневой формы, имеющей продолжение в подводной части склона. Зона смещения оползня в районе м. Саса имеет такое заложение в разрезе, что ее нижняя часть расположена гипсометрически ниже уровня Байкал или попадает в зону переменного обводнения (рис. 3.15).

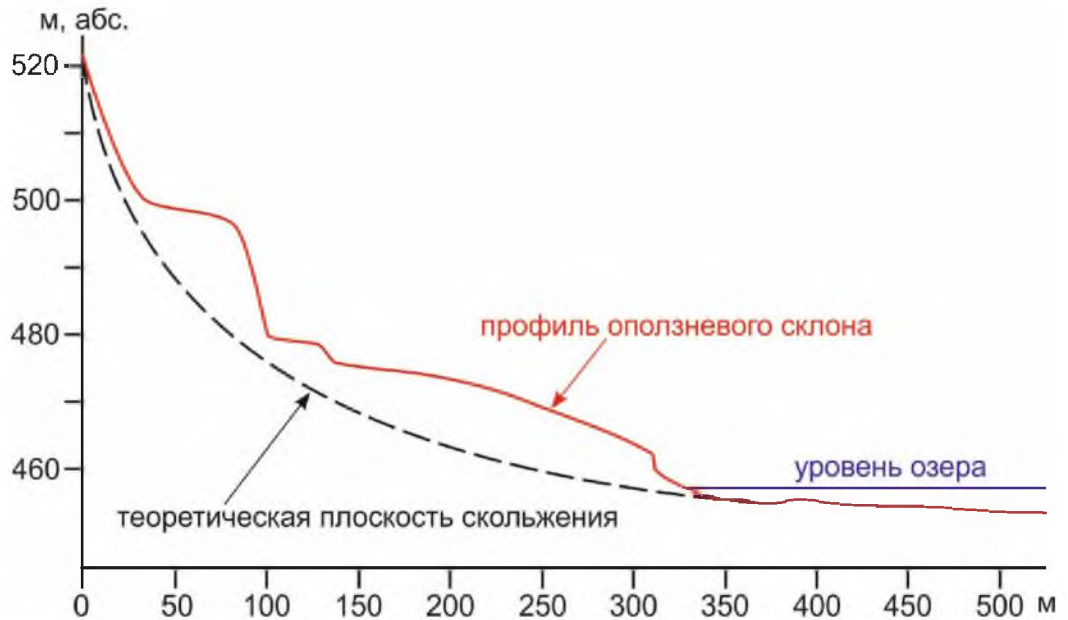


Рисунок 3.15. Профиль оползневой формы участка Саса.

Повышение уровня или нахождение уровня на высоких отметках приводит к увлажнению основания склона и провоцирует оползневые подвижки – обновление форм. С 2005 г. не отмечено обновления форм. Склон сухой, отмечено разрушение процессами выветривания оползневых элементов. В настоящее время абразионно-оползневой склон находится в стадии относительной стабилизации и размыва сошедших к урезу оползневых масс (рис. 3.16).



Рисунок 3.16. Абразионно-оползневой тип берега в районе мыса Саса.

Значительную протяженность на острове Ольхон имеют абразионно-оползневые склоны, связанные с развитием солифлюкционных оползней. Этот тип деформаций на современном этапе вызван пластическим течением сезонно-талого слоя горных пород по замороженной наклонной поверхности берегового массива. Солифлюкционными оползнями медленного течения поражены склоны заливов Харалгай и Баян-Шунген. Современная мерзлота, несмотря на ее фрагментарность, оказывает значительное влияние на интенсивность развития деформаций байкальских склонов. В пределах берегового склона отмечено распространение линз многолетнемерзлых пород (ММП) в неустойчивом температурном состоянии – высокотемпературные породы ($-0,1^{\circ}$). Деформированные склоны с длительной активной стадией смещения глинистых пород имеют четкие контуры в плане, общий уклон оползневых масс составляет $15-18^{\circ}$. На склоне развита серия разрывных нарушений, ориентированных вдоль него. На пляж поступает рыхлый материал оползневых языков (рис. 3.17).



Рисунок 3.17. Трещины отпора и оползневые массы, поступающие на пляж.

Сползание грунтовых масс в пределах сезонно-талого слоя с образованием полей разрывов и уступов происходит практически в течение всего летнего сезона, поскольку максимальное протаивание достигается в сентябре. Мощность деятельного слоя на участке достигает 3,6 м [Светлаков, 2018]. Особенности литологического строения и температурное состояние грунтов во многом определяют способность к проявлению оползней солифлюкционного типа на береговом склоне. В результате мониторинга установлено, что оползневые смещения на участке Харалдай достигают порядка 4 см/год в верхней части разреза (до глубины 3 м). За эксплуатационный период на абразионно-оползневом склоне бровка берегового уступа отступила на 10 м [Козырева и др., 2014].

Абразионно-обвальный и абразионно-осыпной подтипы

Абразионно-обвальный подтип берега имеет распространение и наибольший потенциал на восточном побережье и в северной части озера – на склонах Байкальского и

Баргузинского хребтов, которые наиболее близко сопряжены с береговой линией и имеют обнажения горных пород на склонах. Водораздел Байкальского хребта между озером и р. Леной проходит в 3–4 км от берега Байкала. Превышения надводных склонов котловины озера над уровнем воды достигают 1300–2200 м (Байкальский хребет), а уклоны достигают 60–85°. Повышенная сейсмичность региона и климатические особенности (значительные перепады дневных и ночных температур, переходы через 0 °С, высокая инсоляция, ливневые фронты, затяжные дожди) влияют на формирование и активизацию обвальных процессов, особенно на обнаженных крутых горных склонах, ориентированных к Байкалу (рис. 3.18).

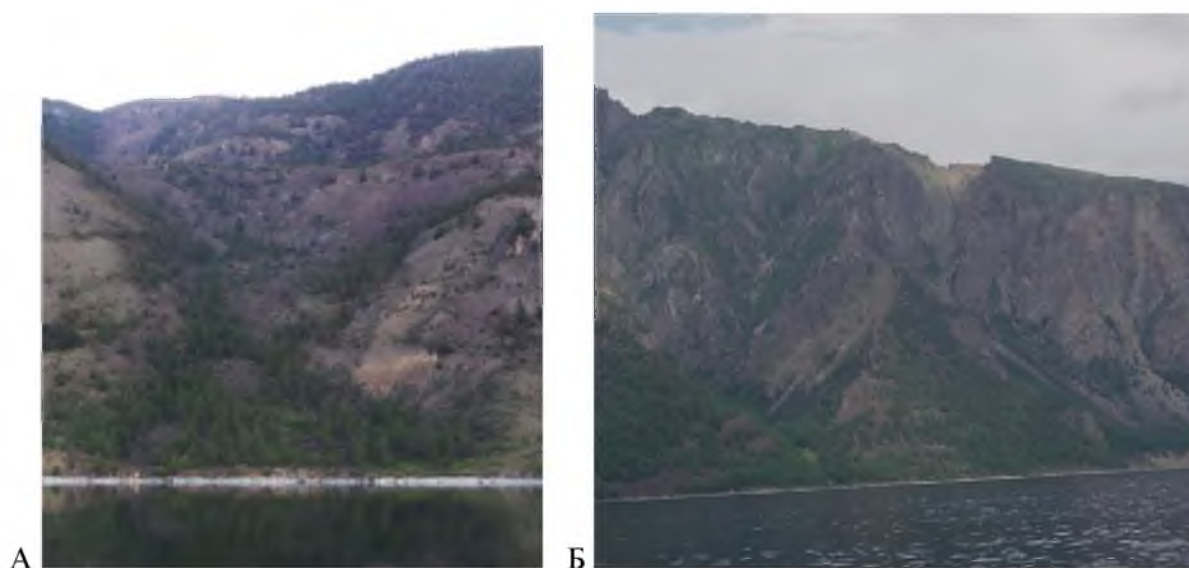


Рисунок 3.18. Осыпные формы в береговой зоне: *А* – конус осыпи; *Б* – свежая осыпь на склоне.

На склонах, сложенных ледниковыми отложениями, активно развиваются осыпи, обвалы. При формировании обвалов непосредственно на клифе вдоль пляжа образуется естественная каменная наброска, гасящая временно энергию волнения, снижая нагрузку на склон (рис. 3.19).



Рисунок 3.19. Абразионно-обвальный тип берега (северо-восточное побережье, сложенное моренными отложениями, фото 2008 г.)

Абразионно-эоловый подтип

Абразионные берега с эоловой переработкой развиваются в пределах распространения песчаных полей в береговой зоне. Поля неогеновых песчано-глинистых отложений и мел-палеогеновых кор выветривания кристаллических пород архейского возраста в верхней части разреза хорошо отсортированы и представлены среднезернистыми кварцевыми песками. Среди проявлений эолового процесса на берегах Байкала встречаются как древние, так и современные формы. Образование древних эоловых форм относится к верхнему плейстоцену – началу голоцена и связано с сильным иссушающим влиянием ветров в период оледенения. Проявление современного эолового процесса в условиях более влажного климата связано с остепнением отдельных участков, нарушением растительного покрова. В динамике развития эоловых процессов выделяется два цикла: до подъема уровня воды (в связи с наполнением Иркутского водохранилища), т.е. в естественных, природных, условиях, и после создания плотины Иркутской ГЭС, т.е. в процессе техногенеза. В результате нарушения природного равновесия в береговой зоне ветровой эрозии подверглись наиболее древние эоловые формы [Агафонов и др., 2001]. Динамика современных эоловых процессов дифференцирована и зависит от состава и свойств субстрата, скоростей ветрового режима.

Унаследованные эоловые формы широко распространены вдоль западного побережья острова Ольхон и характеризуются разнообразным проявлением процесса. В

настоящее время на острове отмечаются семь песчаных массивов, два из которых в южной части представлены развеваемым покровом крупнозернистых песков в типично степном ландшафте. Наиболее крупным по объему песчаного материала и по мощности отложений является массив Нюрганский (Песчанка), простирающийся в юго-западной части побережья Нюрганская Губа [Агафонов, Акулов, 2006].

На восточном побережье от мыса Горевой Утес до мыса Тонкий по основной акватории Байкала распространены эоловые поля. Развитие эоловых процессов на восточном берегу оз. Байкал связано с интенсивной вырубкой леса, абразионным процессом и воздействием на открытую поверхность ветров северо-западных и западных румбов. Осушенные отмели и клиф при низких уровнях подвергаются дефляции и служат источником поступления песчаного материала выше по склону [Вика и др., 2003].

В районе мыса Каткова распространен дюнный комплекс. Уклон поверхности песчаного поля составляет $6-7^\circ$, поле простирается от уреза на расстояние 330 м. В пляжевой зоне прослеживается серия вторичных уступов. Высота абразионного уступа достигает 1 м, клиф значительно переработан дефляцией – эоловым процессом. На локальных участках пляжа отмечено образование лагун, отделенных от озера пересыпью.

Развитие современных эоловых процессов на восточном побережье Байкала началось в результате вырубки леса. Оголение поверхности древних эоловых форм привело перевеванию, началу формирования дюн. За период 1951–1980 гг., после повышения уровня в Байкале, дистальные концы дюн в районе Каткова продвигались в сторону лесного массива со скоростью от 0,17 до 2,93 м/год [Вика и др., 2003]. Приращение площади песчаного массива в настоящее время происходит как за счет вовлечения древних дюнных песков в эоловую переработку и наступление на лесной массив, так и за счет активных аккумулятивных процессов в береговой зоне (рис. 3.20).



А



Б

Рисунок 3.20. *А* – наступление песчаных дюн на лесной массив; *Б* – аккумуляция песчаного материала в береговой зоне.

Эоловые поля в зоне воздействия байкальских вод подвержены техногенному влиянию, как прямому: строительство кемпингов, стоянок, прокладка дорог с нарушением растительности, так и через абразионную нагрузку на склон. Байкальская территория в районе оз. Котокель, р. Турка и до с. Максимиха выделена как площадка для организации особой экономической зоны (ОЭЗ) туристско-рекреационного типа Республики Бурятия. При освоении и организации зон отдыха необходим учет выявленных ранее особенностей развития берега этого района, контроль за состоянием природных территорий, мониторинг как динамики экзогенных процессов, так и экологического состояния. Необходим комплексный контроль состояния уникальных береговых объектов.

Абразионно-аккумулятивный подтип

Абразионно-аккумулятивный подтип берега распространен в местах развития унаследованных аккумулятивных форм. Абразионно-аккумулятивный берег выделен на локальных участках западного побережья Байкала: Малое Море и от Мыса Ото-Хужин до мыса Котельниковский. Аккумулятивные террасы представлены петлевидными косами и разными формами двустороннего питания. Мысы-конусы выноса, на оконечностях которых или в волновой тени которых сформировались аккумулятивные террасы, сложены серией береговых валов, отчленяющих лагуны [Рогозин, 1993].

В Малом Море отмечен ряд петлевидных кос. Участок Ото-Хушин, напротив о. Ольхон, представляет собой крупный вал, отчленяющий лагуну, один из самых крупных на Байкале. Коса-стрелка формировалась вдольбереговыми потоками наносов юго-восточного направления. По материалам исследователей известна эволюция косы в прошлые периоды ее существования. После поднятия уровня она частично была разрушена [Рогозин, 1993], в том числе из-за изъятия галечного материала для строительных нужд. На современном этапе коса Ото-Хушин пополняется наносами, приносимыми вдольбереговыми течениями. Ее дистальный конец нарастает и смещается в сторону склона, так же как и на других участках восточного берега. При продольных ветрах северо-восточного или юго-западного направления на восточном берегу Байкала у конусов Рытый, Шартла, Заворотный, Елохин, Котельниковский и др. перемещение наносов осуществляется от основания к концевым частям, где затем происходит частичная аккумуляция транспортируемого материала [Геоморфология дна Байкала, 1964].

Усиление абразии после подъема уровня Байкала привело к увеличению объема рыхлообломочного материала, поступающего во вдольбереговой поток наносов. Большинство аккумулятивных форм восстановили свои прежние (унаследованные) размеры и увеличили объем. Однако некоторые аккумулятивные формы разрушаются

абразией из-за недостатка «питающих» наносов. Динамика абразионно-аккумулятивных процессов на участках берега зависит от локальных гидродинамических условий, которые и определяют объем влекомого валунно-галечного материала [Динамика берегов, 1976].

Коса Заворотная – единственное место для укрытия судов от сильных ветров и штормов на Байкале. Каменная коса сформировалась из конуса выноса речки Заворотной в результате переноса взвешенного материала волнениями северо-восточных ветров (Геоморфология дна Байкала, 1964). С повышением уровня воды в озере береговой вал на косе Заворотной к 1971 г. был затоплен и размыв, площадь косы сократилась. При понижении уровня воды в Байкале сформировался новый вал, и позже таких валов стало несколько. Дистальный конец косы удлинился, продолжая заворачивать в сторону бухты. Динамика абразионно-аккумулятивных берегов зависит от колебаний уровня [Динамика берегов, 1976]. Формирование аккумулятивных форм с питанием вдольбереговыми наносами зависит и от гидродинамических условий, от положения уровней в многолетнем и годовом плане. Параметры форм и объёмы меняются во времени и пространстве. За период эксплуатации механизм развития аккумулятивных форм не изменился, трансформировались очертания форм и снизилась скорость накопления материала. В настоящее время это все еще подвижные, динамичные береговые формы, требующие детальных исследований и контроля состояния, фиксации изменений в зависимости состояния от уровня режима и изменения локальных условий (рис. 3.21). Территории абразионно-аккумулятивных берегов удобны для организации отдыха, стоянок кораблей, спокойных заводей, осмотра живописных мест. Однако на таких территориях необходимо строгое соблюдение размеров водоохранных зон и общедоступности к пляжу на всем протяжении берега.



Рисунок 3.21. Коса Заворотная (фото 2017 г.).

При оценке состояния и перспектив развития группы абразионных берегов важно учитывать вклад в их развитие процессов, протекающих в пределах всего берегового склона, элементами которого являются малые и средние водосборы, которые открываются в береговую зону. Подошвы склонов, которые не дренируются русловыми формами, опираются на линию береговой зоны и подают в зону прибоя обломочный материал, подготовленный процессами выветривания и перемещенный вниз склоновыми процессами. Руслу поставляют в береговую зону сортированный материал, крупность которого зависит от параметров водосборного бассейна. К шовной линии береговой зоны в разное время в разные ее места поставляется разновозрастный и полигенетичный обломочный материал [Игнатов, 2004]. Механизмы, динамика и особенности развития байкальских абразионных берегов очень изменчивы в пространстве и во многом предопределяются локальными условиями каждого конкретного участка. При освоении побережья, разработке рекомендаций по использованию берега необходимы дополнительные исследования с детализацией данных об экзогенных процессах побережья и их активности.

Аккумулятивная группа

Аккумулятивный тип берега на Байкале характерен для дельтовых участков рек. Наибольшим по протяженности аккумулятивным участком является Селенгинское побережье, окаймленное с одной стороны заливом Провал, а с другой – сором Истокиским. Аккумулятивные берега расположены на юге озера между Култуком и Слюдянкой, в районе рек Голоустная, Бугульдейка, в Баргузинском и Чивыркуйском заливах, на севере озера Байкал – в районе рек Верхняя Ангара и Кичера.

Повышение уровня оз. Байкал в связи с созданием Иркутского водохранилища привело к перестройке гидрологических и экзогеодинамических условий в пределах дельтовых участков. Так, перешеек Мягкая Карга, прошедший длительную историю формирования, на современном этапе испытывает влияние общих сейсмостектонических движений, деградацию полей многолетнемерзлых грунтов и влияние техногенного колебания уровней. Весь перешеек заболочен, при нормальном подпорном уровне низменные участки подтоплены. Заболоченные участки имеют абс. отметки 455,3 м в районе оз. Светлое, 456,6 м в районе протока Бартуй, 455,9 м у берега оз. Малый Арангатуй. Перешеек Мягкая Карга адаптировался к новым уровенным условиям озера, произошла перестройка профиля склона. Формирование аккумулятивных берегов происходит в новых условиях. Наблюдается чередующийся привнос песчаного и илистого материала на пляж, что прослеживается в разрезе пляжевых отложений (рис. 3.22). На

подводном склоне отмечены участки концентрации ила и торфяные поля. В пляжевой зоне преобладают песчаные частицы средней (29,8 %) и крупной (26,0 %) размерности.

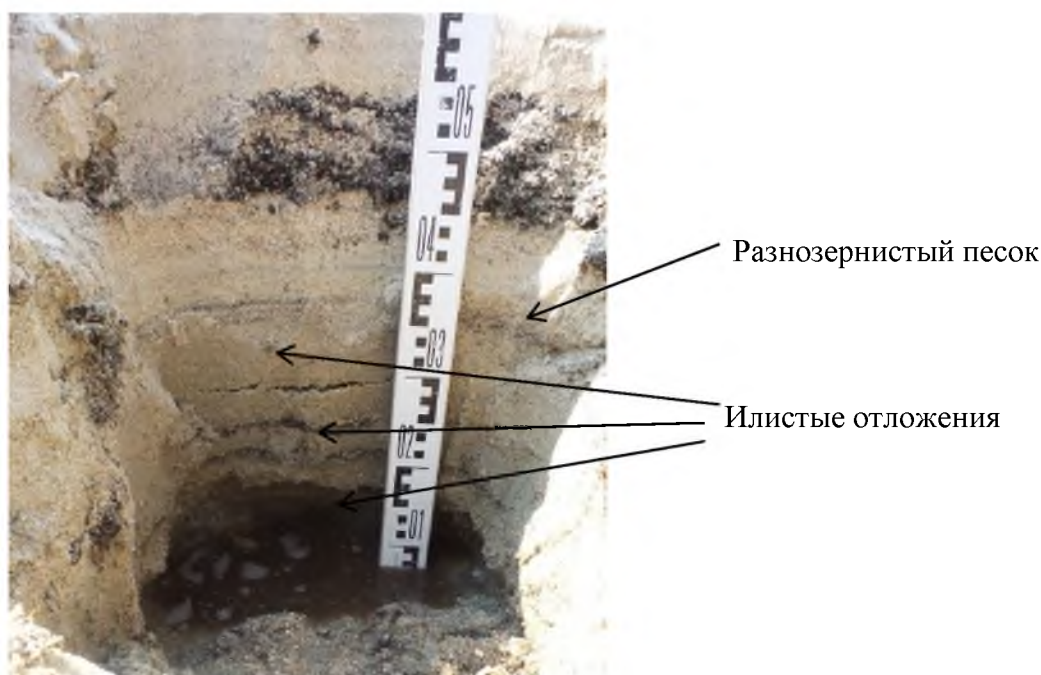


Рисунок 3.22. Аккумулятивный берег Мягкая Карга со стороны Чивыркуйского залива (фото 2017 г.).

Аккумулятивный бар Ярки на севере озера Байкал находится также в стадии трансформации. Особые ветроволновые условия создают предпосылки для развития абразии в пределах южного пляжа бара. Уничтожение древесного и растительного покрова стало причиной активизации эолового переноса песчаного материала. Исторические аспекты освоения севера Байкала и строительство Байкало-Амурской магистрали привели к снижению твердого стока в реках, питающих бар.

В настоящее время бар Ярки находится в стадии трансформации с элементами деградации песчаного массива (рис. 3.23). В сложившихся условиях повышения и регулирования уровня воды в Байкале бар, не успевая приспособиться к новому уровню, т.е. переместиться вверх по склону лагуны, испытывает разрушение. Оказывает влияние и недостаточность поступления наносов из рек Верхняя Ангара и Кичера [Вика и др., 2006]. Значительная часть песка, поставляемая волнами от устья Верхней Ангары, уходит в промоину протяженностью 2,3 км, благодаря чему наращивается ширина мелководья со стороны Ангарского сора. Аналогичная картина имеет место и в промоине между первым и центральным фрагментами острова-бара (рис. 3.23, А). Восточные концы фрагментов-островов в промоинах интенсивно размываются. Уменьшение количества перемещающегося во вдольбереговом потоке материала приводит к тому, что волновая энергия расходуется не на перенос частиц, а на абразию дна и берегов (рис. 3.23, Б).

Деформация профиля песчаного бара за период с 1976 по 2006 г. показала, что средняя скорость размыва по профилю составляет около $16 \text{ м}^3/\text{год}$ с одного погонного метра берега. Размытый материал частично аккумулируется на мелководье – около $10 \text{ м}^3/\text{год}$ на один погонный метр, частично поступает на глубину, перехватываясь подводными ложбинами, и каньонами, и уходит за пределы района бара. В процентном соотношении около 60 % размытого материала аккумулируется на мелководье, а 40 % уходит за пределы береговой зоны. Современные потоки наносов у о. Ярки – важный фактор, объясняющий динамику острова-бара, а с учетом и других факторов – его эволюцию [Потемкина и др., 2008].



Рисунок 3.23. *А* – промоина и центральный останец бара Ярки; *Б* – абразионный клиф южного склона (фото 2007 г.)

Эволюционное развитие бара Ярки отражает сочетание общих геолого-структурных особенностей региона и техногенные нагрузки, это последовательная смена состояний аккумулятивной формы во времени и пространстве. Для принятия эффективных решений по стабилизации и разумному использованию уникального объекта природы необходим комплексный научный анализ всех процессообразующих компонентов.

Биогенный тип берега развивается на берегах озера в заливах и бухтах, где волнение не оказывает заметного влияния на перемещение водных масс и переформирование подводного берегового склона, где создаются условия для хорошей прогреваемости вод, роста растительности и ее накопления.

Уклон профиля устойчивого биогенного берега не превышает 5° , распространен в заливах и лагунах. Унаследованный биогенный тип берега представлен небольшими участками в заливах Провал, Чивыркуйский, Верхней Ангары; в основном это болотистые участки, торфяники (рис. 3.24).



Рисунок 3.24. Биогенный тип берега (юго-восточное побережье озера).

Биогенный тип берега выделен на участке заливе Чивыркуй. Ключевой участок в бухте Безымянная сложен торфяными отложениями, мощность которых составляет 2–3 м. В настоящее время биогенный берег при повышении уровня размывается, сформировав абразионный уступ высотой до 1,5 м. Пляж шириной до 5 м представлен толщей торфяных отложений, перекрытых незначительным чехлом песка. На подводном береговом склоне также встречаются торфяные поля, глубже которых – глина и ил. Выше берегового клифа расположена территория с болотной растительностью, кочкарником, редколесьем (рис. 3.25).



Рисунок 3.25. Размываемый болотно-торфяной берег на участке бухты Безымянной.

Формирование устойчивого биогенного типа берега – длительный процесс накопления постоянно присутствующей биомассы, потому протяженность выделенных биогенных берегов незначительна относительно общей протяженности берегов Байкала и может варьироваться. Многие участки с унаследованным накоплением биогенного материала (торф, болотная растительность) подвержены размыву и в зависимости от положения уровня в сезонном и многолетнем ходе эксплуатации озера могут переходить в группу абразионных берегов, формируя абразионно-биогенный подтип.

Техногенная группа

К техногенному типу берега относятся берега, укрепленные активным или пассивным методом. Укрепление берегов на Байкале выполнялось активными методами, направленными на снижение нагрузки на склон, – бунами, волноломами, и пассивными методами – волноотбойными стенками, ряжами, укрепленными пирсами.

На участке берега, где проложена железная дорога, от порта Байкал до станции Мысовая, на 60 % берег контролируется линейными, берегоукрепительными и припортовыми сооружениями (юго-западный и юго-восточный склоны озера). Были возведены волноотбойные стенки, волноломы и другие сооружения. Весь отрезок Кругобайкальской железной дороги, за исключением мысов, оказался зарегулированным берегоукрепительными сооружениями, а также был укреплен восточный склон на наиболее сложных участках, где фиксировались значительные размывы. В настоящее время часть берегоукрепительных сооружений реконструирована или возведены новые укрепления с применением современных технологий и теоретических разработок в берегозащите (рис. 3.26).



Рисунок 3.26. Берегоукрепительное сооружение – волноотбойная стенка, обновленная отсыпкой крупноглыбовым материалом (восточное побережье, фото 2013 г).

На Байкале применяются волногасящие бермы – сооружения из дробленого несортированного каменного материала, производят отсыпку таким материалом пляжей вдоль береговых уступов. В результате воздействия волн временный строительный профиль отсыпанного материала переформируется и подстраивается под естественный профиль. Сооружение принимает вид устойчивого каменистого пляжа, который аналогичен природному берегу. Эта технология практически не нарушает естественного облика прибрежных территорий, эффективно защищает железнодорожное полотно от абразионного воздействия волн и ледовых надвигов [Куделин и др., 1995].

Многолетний опыт показывает, что надежно защитить берег можно лишь при оптимальном сочетании методов пассивной и активной защиты, направленных на создание и сохранение пляжей, являющихся эффективным гасителем энергии волн. При этом необходимо тщательно изучать природные условия каждого осваиваемого участка [Динамика берегов, 1976]. Следует учитывать, что Байкал – олиготрофный водоем, незначительное увеличение в нем биогенов или содержащих их легкоокисляемых органических веществ может привести к нежелательным последствиям, связанным с эвтрофированием. Необходим контроль за материалом отсыпки. Исследования по химическому и микроэлементному составу горных пород показали, что в качестве основного строительного материала волногасящих берм предпочтительнее использовать граниты [Афони́на др., 2013].

На севере Байкала, в районе Нижнеангарска от устья реки Сырой Малокон до реки Кичера, выполнена отсыпка пляжа крупноглыбовым материалом со стороны Тыйской аккумулятивной равнины.

На участке Турка возведены современные укрепления, портовые сооружения с применением новых материалов и технологий берегоукрепления. Он находится на восточном берегу озера Байкал в 169 км от г. Улан-Удэ, в устье одноименной реки. Порт в поселке Турка стал первым участком, с которого началось создание особой экономической зоны «Байкальская гавань» в Республике Бурятия. Это один из планируемых центров водного туризма и оборудованный порт на восточном побережье Байкала (рис. 3.27). Строительство порта началось в сентябре 2009 г., первый пусковой комплекс порта сдан в 2010 г. В него входит центральный причал на 150 причальных мест с понтонами, а также брекватер, буна с каналами для промыва, эстакады для подъема судов.



Рисунок 3.27. Берегоукрепление, участок Турка (фото 2016 г.).

3.3. Экзогеодинамика береговой зоны: этапы техногенной трансформации байкальских берегов

До технического поднятия уровня воды в озере Байкал на долю абразионно-устойчивых берегов приходилось 10 %, абразионных – 72 % и аккумулятивных – 18 %. Берега, сложенные рыхлыми породами, в естественных условиях колебания уровня воды в озере отступали в среднем на 10–20 м за 100 лет (по данным Е.К. Гречищева 1958 г.).

Е.К. Гречищев, Н.П. Ладохин, О.К. Леонтьев, В.С. Микокон представили карту геоморфологии и динамики берегов Байкала и Иркутского водохранилища масштаба 1:15000 000, где обозначены берега денудационно-абразионного, абразионного, абразионно-аккумулятивного и аккумулятивного типа. Отмечено, что после поднятия уровня в озере Байкал произойдет перераспределение в балансе наносов, поступающих из различных источников. Возрастут потоки донных и пляжевых наносов за счет разрушения берегов, снизится эоловый перенос с осушаемой полосы мелководья. Размывы берегов, сложенных песчано-глинистыми отложениями мезозоя, осложнены оползнями. Средняя скорость смещения оползней юго-восточного побережья прогнозировалась 0,5 – 40 см/год [Атлас Иркутской области, 1962].

Период 1959–1964 гг. – этап повышения уровня в озере Байкал, который привел к переформированию берегов на всем протяжении. На денудационно-абразионных берегах происходил подмыв высоких уступов с образованием почти вертикальных обнажений, отступление берега составило 2–3 м. На абразионных берегах размывы достигали 30–40 м и более. Максимальные размывы зафиксированы на участках, сложенных песчано-глинистыми отложениями, – Песчанка (о. Ольхон), район Нижнеангарска, Гремячинск. При новом уровненом режиме ширина размыва берегов в песчано-глинистых отложениях достигла в районе пос. Сухая 70 м, в бухте Песчаной (о-в Ольхон) – 30 м, в районе Нижнеангарска и Гремячинского – 50 м. Абразионный берег вплотную подошел к участкам Турки, полотну шоссейной дороги Улан-Удэ – Баргузин, рыбоприемному пункту на о. Ольхон. Аккумулятивные формы в этот период были существенно разрушены или подтоплены. В бухте Заворотной многочисленные ранее существовавшие валы затоплены. Сформировались новые валы в виде полосы шириной 15–25 м, приподнятые на 1,0–1,5 м. Новые формы причленены к прежним под углом [Гречищев и др., 1968].

Первый период технической эксплуатации о. Байкал (1964–1974 г.) проходил при высоких уровнях воды в озере за последние 200 лет. В работе «Динамика берегов озера Байкал...» [Пинегин и др., 1976] подведены итоги первого периода эксплуатации и впервые акцентировано внимание на том, что решающее значение для морфологии и динамики берегов имеет структурно-тектонический план территории. Тектонические структуры контролируют общее направление берегов Байкала и на значительном протяжении определяют их морфологический облик. Контур береговой линии озера Байкал предопределен разрывными и складчатыми структурами. С учетом специфических особенностей формирования Байкальской рифтовой впадины выделен особый структурно-абразионный тип берега. За этот период эксплуатации усилились размывы берегов. Подмыв основания склонов привел к активизации старых и возникновению новых склоноформирующих процессов: обвалов, оползней сплывов, солифлюкции, осыпей. К первому периоду эксплуатации относятся факты возникновения крупных оползней, например оползень в районе мыса Саса, активизации солифлюкции на острове Ольхон.

Размыты многие аккумулятивные участки берега, формировавшиеся при бытовом уровне в течение длительного времени. Наибольшим разрушениям подверглись аккумулятивные формы, отчленяющие лагуны и бухты, – косы, бары и пересыпи. Многие из них исчезли вообще. Так, в период с 1962 по 1973 г. исчезли пересыпи в районе Култука, бары, отчленяющие сор Чикалово (о. Бабыя Карга) и залив Провал. Часть

аккумулятивных форм деградировала, другие восстанавливаются, благодаря усилившемуся притоку наносов. На юго-западном побережье на незатопленных участках террас берег отступил на 18 м. Высокие берега протяженностью 17 км были размыты на 7,6 м [Инженерная геология..., 1968].

Аккумулятивные террасы и пролювиально-делювиальные шлейфы размывались со скоростью от 1,0 до 105,7 см/год, цокольные байкальские террасы – до 5 см/год, скальные обрывы – до 0,033 см/год. Максимальные размывы (40– 64,5 см/год) отмечались в высоких (8–10 м) абразионных уступах, сложенных песчаным материалом. Оползневые отступления берега в июле 1971 г. составили до 10–15 м за несколько суток. Результаты проведенных исследований еще раз свидетельствовали об усилении абразионного сноса в периоды высокого уровня воды на Байкале в 1971 и 1973 г. Временное снижение уровня, особенно в 1972 г., значительно уменьшало интенсивность абразии, а местами приостановило активность оползней. Однако было отмечено, что все эти процессы ритмично активизировались в периоды очередного подъема уровня, достигая максимальных значений, превышающих НПП водохранилища на 0,2–0,3 м [Агафонов, 1990].

Для первого этапа эксплуатации А.В. Пинегиным составлена карта-схема морфологии и динамики берегов озера Байкал. Выделены структурно-абразионный, денудационно-абразионный, абразионный, абразионно-аккумулятивный и аккумулятивный типы берегов. Протяженность береговой линии составляет более 2000 км, абразионный тип берега развит на протяженности 1800 км (80 % всей длины береговой линии), на долю аккумулятивных берегов приходится немногим более 10 % от общей их протяженности.

В 80-е годы продолжают исследования берегов Байкала на локальных участках. А.Б. Иметхенов детально исследовал кайнозойские отложения на юго-восточном побережье озера в связи с неспадающей динамикой размыва берегов и значительной активизацией оползневого процесса [Иметхенов, 1987]. А.А. Рогозиным было уделено особое внимание аккумулятивным формам и их трансформации в ходе поднятия уровня на Байкале [Рогозин, 1993]. В работе Б.П. Агафонова приводятся данные о состоянии берегов озера Байкал. Протяженность генетических типов берегов определена им на основании топографической карты масштаба 1:100 000 и составила 2077 км. Протяженность абрадируемых (абразионных) типов около 1766 км (85 %), остальные – 15 % приходятся на укрепленные и аккумулятивные берега. 568 км – абразионно-аккумулятивные, 379 км – скальные, устойчивые к разрушению берега. В развитии берегов Байкальской впадины, в совокупности с процессами абразии и аккумуляции,

большую роль играют оползни, обвалы, осыпи и сели [Агафонов, 1990]. В 1993 г. А.А. Рогозин дал характеристику состояния аккумулятивных берегов озера Байкал, которые составляли 23 % от общей протяженности берега, и кратко описал состояние других генетических типов берегов озера Байкал [Рогозин, 1993]. В 1993 году в научно-справочном атласе «Байкал» представлена карта В.И. Галкина «Геоморфология и динамика берегов и дна Байкала» масштаба 1:2500 000, на которой показаны типы берегов и рельеф побережья на период 90-х годов, после почти 30-летней эксплуатации [Байкал. Атлас, 1993].

В диссертационной работе при типизации береговой линии в основу картографирования побережья положена генетическая классификация О.К. Леонтьева [1963], которая была использована также предыдущими исследователями для типизации береговой зоны Байкала – А.В. Пинегиным, А.А. Рагозиным, Е.К. Гречищевым, Н.П. Ладохиным. Это дает возможность сопоставить данные, с учетом положения уровня и результатов последнего периода исследований определить особенности эволюции береговой зоны за период техногенеза (табл. 3.1).

В основу карты типов берегов на современном этапе эксплуатации озера Байкал положен геолого-генетический принцип формирования берегов озера с учетом инженерно-геологических особенностей развития береговой зоны озера Байкал:

А) структурно-тектоническое строение – наличие рельефообразующих тектонических разломов.

Вслед за А.В. Пинегиным, А.А. Рогозиным, Б.П. Агафоновым выделен особый генетический тип берега с характерным для байкальских берегов профилем склона – структурно-абразионный тип берега. Структурные берега в большей части маркируют положение плоскостей крупных региональных и локальных разломов. Его формирование и развитие связано с разломной тектоникой региона, геологическим строением, свойствами горных пород, степенью выветрелости и устойчивости их к размывам.

При построении использована электронная карта разломов юга Восточной Сибири [Лунина и др., 2010].

Б) геологическая основа – метаморфические, магматические и осадочные породы кайнозоя–мезозоя.

В геологическом строении береговой зоны озера Байкал принимают участие различные по составу и возрасту горные породы, которые объединены в инженерно-геологические формации, учитывающие пространственное положение, возраст, принадлежность к единой тектонической эпохе формирования, степень метаморфизма пород, а также параметры физико-механических свойств данного комплекса.

В работе использованы геологические карты и информация о возрасте, составе, строении и свойствах горных пород в береговой зоне озера [Инженерная геология СССР. Том 3., 1977; Байкал. Атлас, 1993; Байкаловедение, 2012].

В) параметры уклонов берегового склона – наклоны поверхности надводного склона и подводной части примыкающей к зоне прибоя.

Таблица 3.1.

Классификация берегов		Этапы эволюционного развития береговой зоны озера Байкал					
		Этап естественного состояния	Этапы техногенного регулирования уровня воды в озере (протяженность берега, км, и % от общей протяженности)				
Группа	Тип	До технического повышения уровня [Гречищев, 1958]	I этап (1959–1974 гг. XX века)		II этап (1974–1995 гг. XX века)		III этап (1995–2014 гг.)
			Период повышения уровня 1959–1964 гг. [Инженерная геология, 1968]	Первый период эксплуатации 1964–1974 гг. [Пинегин и др., 1976]	Период эксплуатации 74–82 гг. [Агафонов, 1990]	Период эксплуатации 82–95 гг. [Рогозин, 1993]	
Абразионные	Структурно-абразионные	10 %		1800 км (80 %)	1766 км (85%)	77%	717,95 км (34,6 %)
	Абразионные	72 %					906,28 км (43,7 %)
Аккумулятивные	Аккумулятивные	18 %		20 %	311 км (15 %)	23 %	421,78 км (20,3 %)
	Биогенные						
Укрепленные	Техногенные						28,16 км (1,4 %)
Показатели размыва		10–20 м за 100 лет	От 1–2 до 30–40 м и более	10–20 м за 4 года	15 м в сутки	Относительно I этапа активизация снижена	10 м (оползневой склон) за 15 лет
Общая протяженность берегов, км		2000	Около 2000	свыше 2000	2077	Более 1800	2074,18

Байкальская впадина асимметрична, особенно ее подводная часть. Наибольшую крутизну имеет подводный склон западного берега – до 60 °, прибрежные отмели вдоль него развиты слабо. Средняя крутизна склонов восточного берега, на которых присутствуют прибрежные отмели составляет 7 – 10 ° [Байкаловедение, 2012]. Экспедиционные исследования показали, что профиль берегового склона структурного берега, подводной и надводной части, крутой (более 30°). В пределах абразионных берегов существует многообразие сочетаний между уклонами подводной и надводной части склона. На склонах имеется широкая отмель, уклоны которой колеблются от 1–2 до 17–18°. Высота берегового уступа измеряется от наиболее высокой точки пляжа до верхней бровки, а крутизна берегового уступа отвечает углу естественного откоса слагающих грунтов. На абразионных склонах при повышении уровня волна может сохранять свою высоту до зоны прибоя и на приглубых склонах имеет возможность обрушиться на пляж и формировать абразионный уступ (клиф). При низких уровнях волна воздействует на подводный береговой склон, поскольку ее разрушение начинается на глубине близкой по своему значению к 0,5–1,0 h (высоты волны) [Гречищев, 1961]. Уклоны подводного берегового склона, соответственно глубина воды, а также ширина подводной террасы меняются от участка к участку.

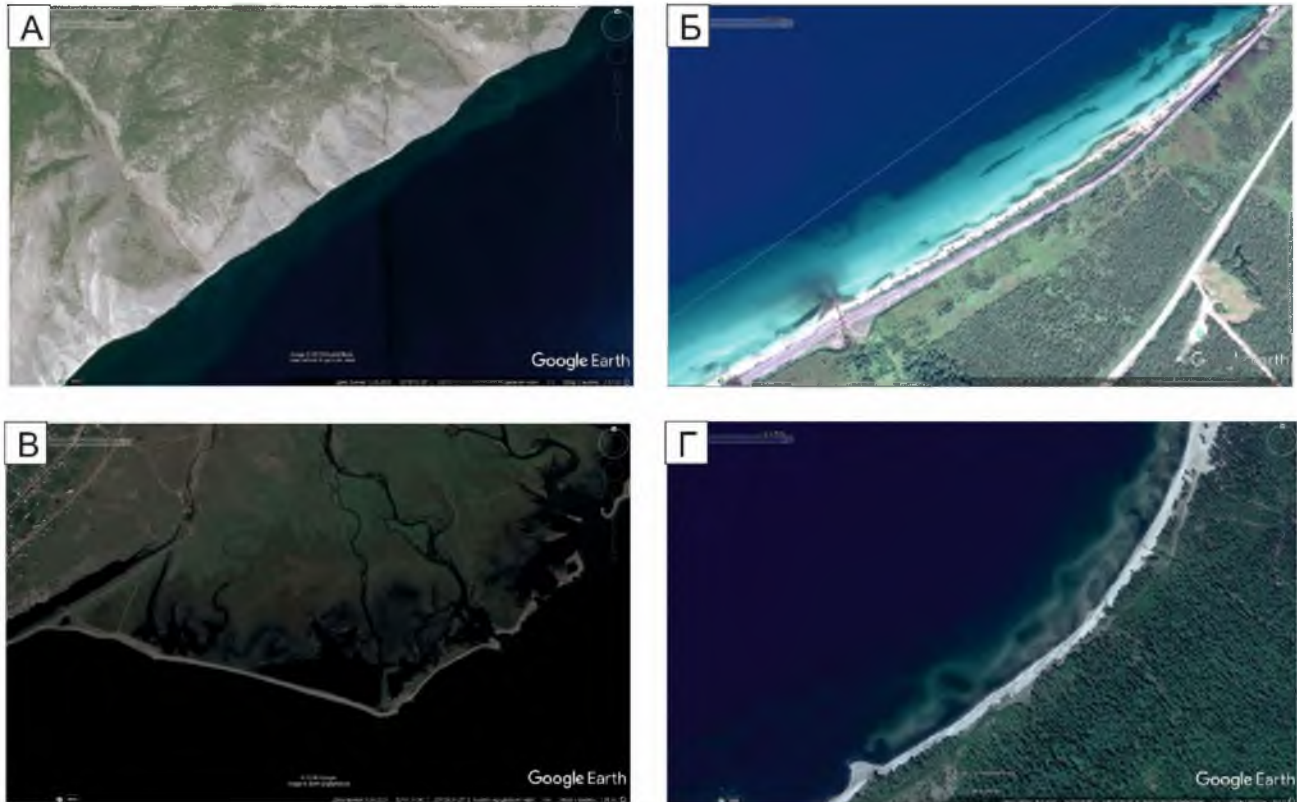
При анализе и построении карты использованы уклоны береговых склонов и дна озера Байкал [Байкаловедение, 2012; сайт ЛИН СО РАН <http://www.lin.irk.ru/>].

Г) развитие и проявление экзогенных геологических процессов в береговой зоне.

В береговой зоне выделены участки с проявлением экзогенных геологических процессов, способствующих трансформации берегового склона, привнесу твердого материала в зону пляжа, – оползней; обвалов и осыпей; эоловые проявления; болота и торфяники; сели. В пределах абразионного типа выделены локальные участки берега со смешанным механизмом переработки склона и определены основные подтипы абразионного и аккумулятивного типа берега.

Детальная информация о типах берегов, механизмах переработки склонов получена в ходе проведения экспедиционных работ выполняемых в рамках НИР с 2000 года. Использована обобщенная информация из опубликованных и фондовых источников о состоянии береговой зоны озера Байкал. В качестве ориентировочных материалов при составлении карты использованы космоснимки Google Earth. Карта составлена с использованием ГИС программ, позволяющих по запросу выполнить выкопировку из общей карты части береговой зоны в среднем и более крупном масштабах. Приведены наглядные примеры локальных участков с характерным развитием основных типов

берегов на основе космоснимков Google Earth (с сохранением авторских прав программы) крупного масштаба (рис. 3.28).



А - структурный; Б - техногенный; В - аккумулятивный; Г - абразионный.

Рисунок 3.28. Типы байкальских берегов.

Составлена электронная карта типов байкальских берегов масштаба 1:2 500 000. Установлено, что в настоящее время при использованной детализации общая протяженность береговой линии озера составила 2 074,18 км, из них структурно-абразионных 717,95, абразионных 906,28 км, аккумулятивных 421,78 км (рис. 3.29).

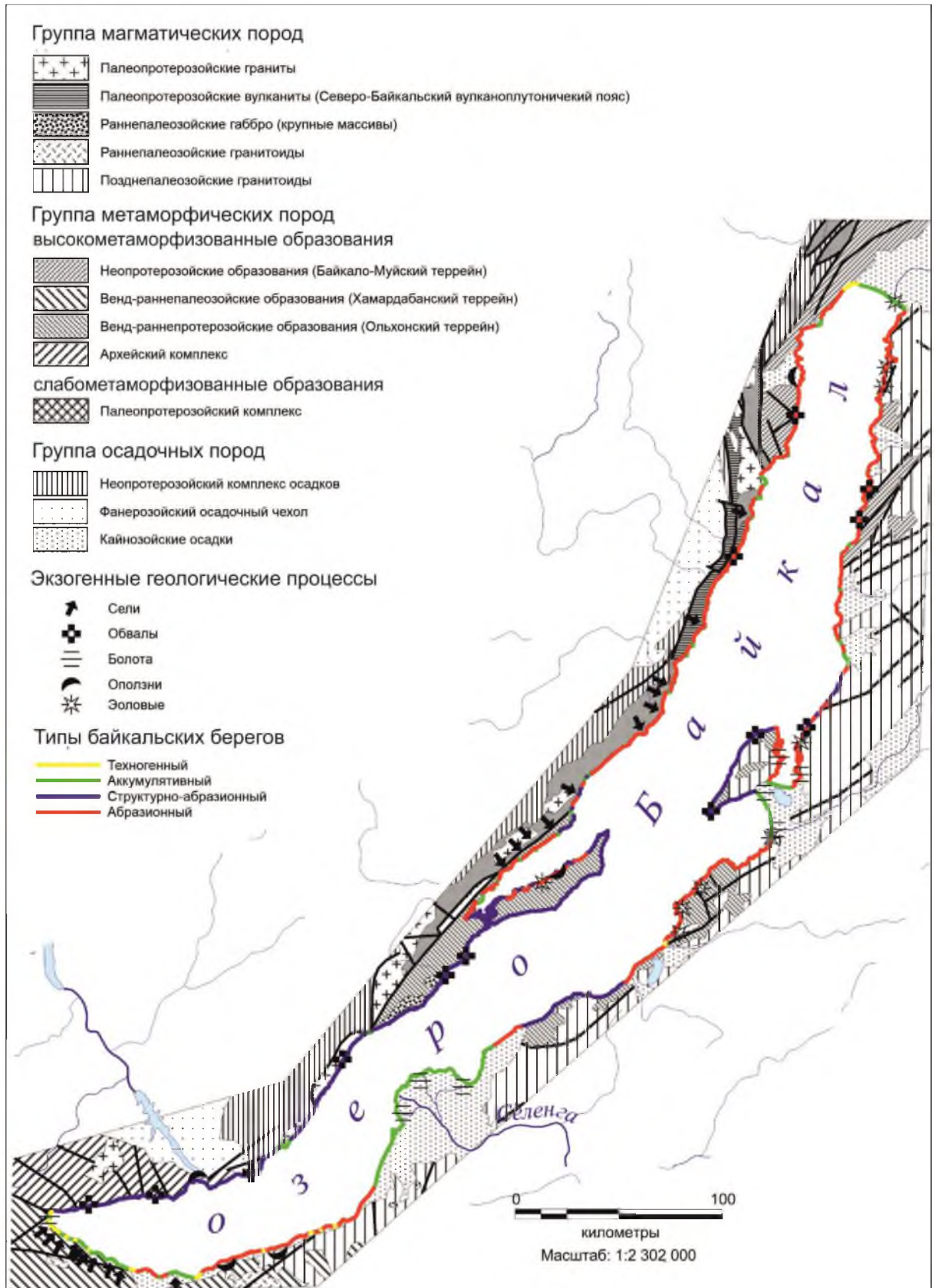


Рисунок 3.29. Карта типов берегов озера Байкал (составили: Козырева Е.А., Рыбченко А.А.).

При последовательном анализе этапов эксплуатации и связанной с ней трансформации геологической среды в береговой зоне озера в результате поднятия

уровня, сравнении данных по протяженности основных генетических типов берегов и данных по динамике абразионного процесса в береговой зоне разных лет видно, что эволюция геологической чреды проходила последовательно. Первый этап эксплуатации сопровождался максимально высокими показателями размыва береговых склонов и активизацией экзогенных процессов, в частности оползней и осыпей. Расхождения в цифрах и в процентном отношении общей протяженности абразионных и аккумулятивных берегов к общей протяженности береговой линии на разных этапах объясняются тем, что авторами их работ были использованы разные топографические основы с разной детальностью масштабов и, следовательно, разная точность измерений. Более крупномасштабная картографическая основа позволяет получить более детальные данные. Измерения протяженности берегов и выделение основных типов берега в масштабе 1:2 500 000 для всего побережья выполнены впервые.

Максимальные размывы берегов озера фиксировались в периоды высокого стояния уровней в водоеме и на этапе существенного изменения колебаний уровня в многолетнем ходе – с 1971 по 1995 год, когда амплитуда изменений уровня воды составляла 2,09 м. 8 октября 1973 года уровень достиг отметки 457,41 м, в мае 1982 года снизился до 455,32 м, поднявшись к октябрю 1983 года до отметки 457 м, а к сентябрю 1988 года – до 457,41 м. Годовые колебания по-прежнему составляли около 1 м. Нестабильное положение уровня воды в озере в многолетнем ходе и его положение на высоких отметках усилили абразионный процесс, что отразилось на высоких показателях размыва первого периода эксплуатации.

В 90-е годы произошло некоторое снижение уровня в озере и стабилизация эксплуатационных параметров. В марте 2001 г. были определены предельные отметки уровня воды в оз. Байкал при осуществлении хозяйственной и иной деятельности: минимальная – 456 м, максимальная – 457 м, и до 2015 года годовые многолетние колебания уровня не превышали 1 м. Соблюдение данного параметра технической эксплуатации привело к определенной стабилизации абразионно-аккумулятивных процессов в пределах береговой зоны озера Байкал.

Также из анализа этапов эксплуатации озера и реакции береговой зоны на техногенное повышение уровня видно, что соотношение показателей протяженности абразионных и аккумулятивных берегов с момента поднятия уровня до настоящего времени практически не изменилось. Протяженность абразионной группы берегов за период эксплуатации природно-технической системы осталась в прежних пределах. Абразионная группа берегов, включающая структурные – устойчивые к размыву – берега, сохранила преобладающее распространение по всей береговой линии озера. За время

эксплуатации выявлены участки проявления возможных значительных размывов при повышении уровня воды в озере.

Большую роль в формировании береговой зоны играют локальные геолого-литологические, геоморфологические и криогенные условия участка. Динамика развития береговых процессов во многом предопределяется локальными условиями геологической среды. Так, за период технической эксплуатации озера сохраняется стабильной динамика оползней, которая в большей степени предопределена геолого-литологическим составом отложений, слагающих склон, геокриологическими условиями локального участка береговой зоны. Например, по западному побережью острова Ольхон солифлюкционные оползни сохраняют свою активность на всех этапах эксплуатации водоема (рис. 3.30). Динамика оползневых смещений неравномерна во времени, в большей мере связана с присутствием в разрезе многолетнемерзлых грунтов и зависит от особенностей температурного режима массива горных пород.

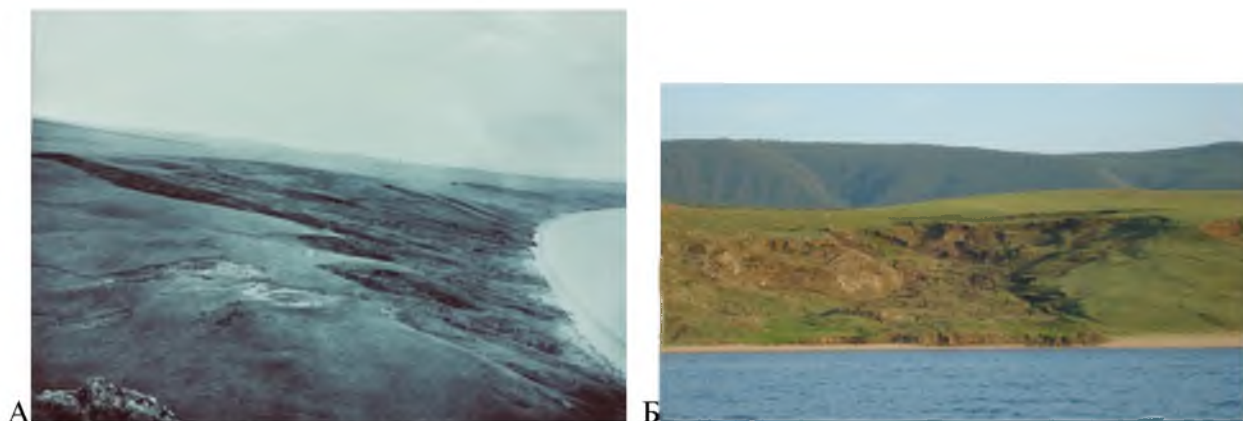


Рисунок 3.30. Солифлюкционные оползни на западном побережье о. Ольхон: *А* – фото 1965 г. из архивов лаборатории инженерной геологии ИЗК СО РАН; *Б* – фото 2017 г.

При детальном рассмотрении динамики береговых процессов на ключевых участках следует отметить, что за эксплуатационный период наиболее подвержены эволюционным преобразованиям аккумулятивные формы. В пределах аккумулятивных форм, как унаследованных (абразионно-аккумулятивный тип берега), так и современных, произошла перестройка формы профиля берегового склона. При наполнении озера аккумулятивные формы, неспособные к адаптации при новых условиях, были затоплены и деградировали, другие все еще испытывают техногенные преобразования и очень подвижны как в плане, так и по профилю склона.

Одна из унаследованных аккумулятивных форм претерпела за период подъёма уровня и эксплуатации озера значительную перестройку. По форме рельефа косы стрелки Ото-Хушун и подводной отмели, существующих на участке вертоволовых условий –

превалирующие влияния продольных ветров с-в и ю-з направлений, видно, что произошло пополнение более крупными наносами внутренней части стрелки, ее заполнение и привнос более мелкой фракции вдольбереговыми течениями на подводный склон. Изменение положения уровня не привело к размыву аккумулятивной формы, произошла ее перестройка по площади и по профилю склона. Дистальный конец нарастает, стрелка косы выдвинута в море, изгибается, наращивая подводную часть, смещается к склону (рис. 3.31).

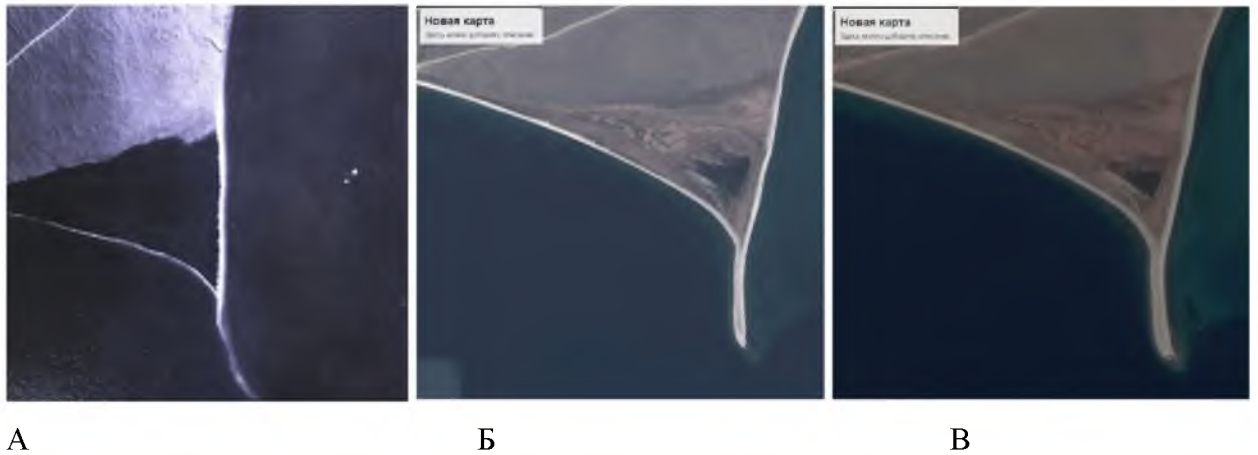


Рисунок 3.31. Изменение морфологии косы Отто-Хушун за период эксплуатации водоема: *A* – фото 1988 г.; *B* – фото 2011 г.; *V* – фото 2016 г.

Типичным примером адаптации аккумулятивного типа берега к новым природно-техногенным условиям является бар Ярки на севере озера Байкал. С одной стороны, это унаследованная, созданная в предыдущие эпохи аккумулятивная форма, с другой стороны – бар, подпитываемый современными аккумулятивными наносами рек Верхняя Ангара и Кичера. Обобщение опубликованных материалов по исследованию бара, анализ полевых материалов, полученных в ходе экспедиционных работ с 2004 по 2007 г., легли в основу выделения этапов трансформации геологической среды бара – острова Ярки. Основным критерием для выделения этапов трансформации объекта явилось его состояние и положение уровня воды в водоеме на каждом из этапов преобразований (рис. 3.32).

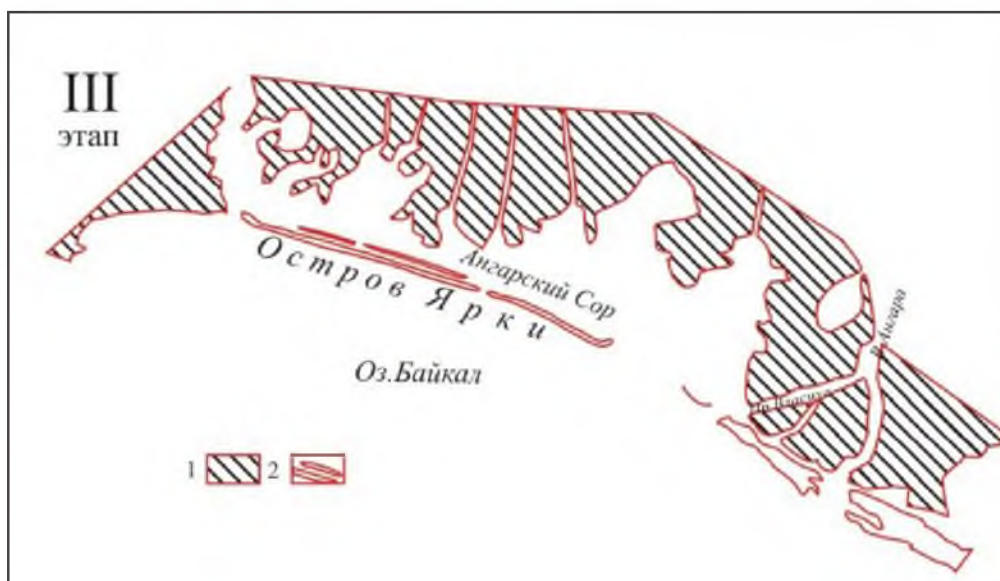
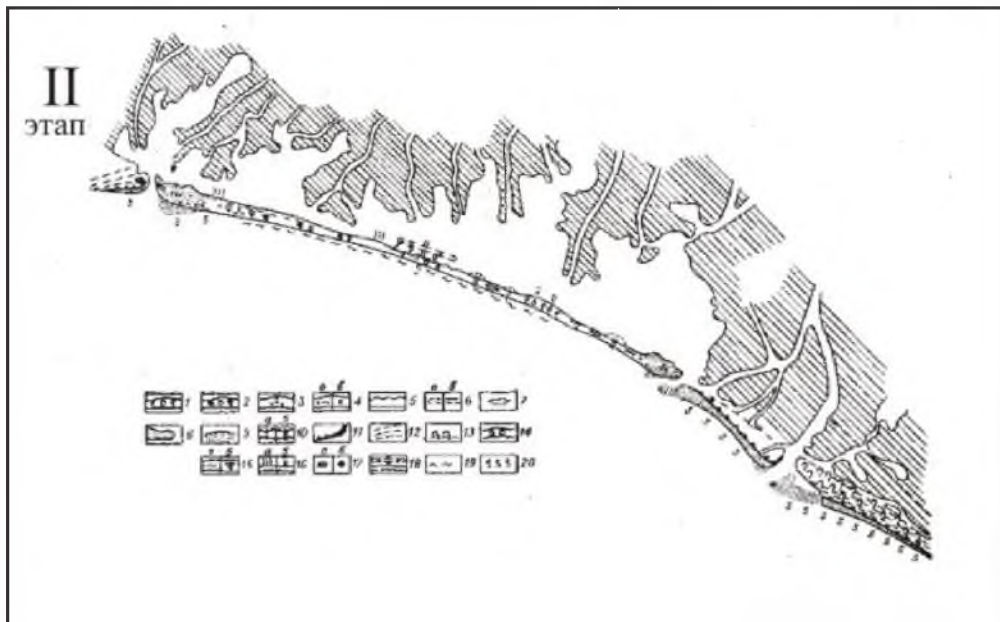
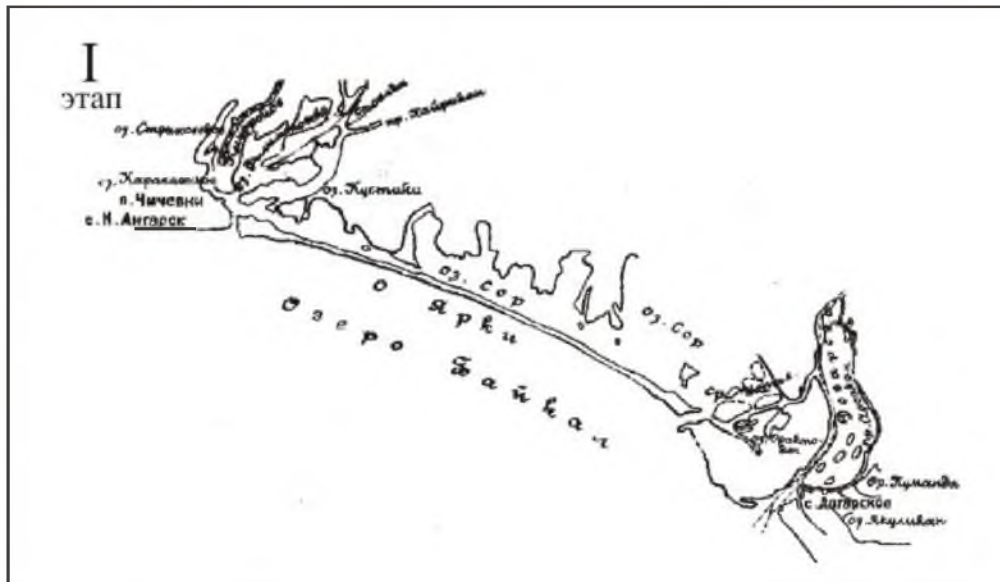


Рисунок 3.32. Схема трансформации острова Ярки

I – первый этап – естественное развитие (по материалам 1932 г);

II – второй этап – 1960 – 80-е годы XX века (по материалам А.А. Рогозина):

1 – Кедровые Ярки;

2 – Березовые Ярки с котловинами выдувания;

3 – Кустарниковые Ярки;

4 – участки Ярков, лишённые растительности вследствие их перехлеста волнами (а), и участки, где при понижении уровня возобновляется травянистая растительность (б);

5 – участок Ярков с мысами-языками;

6 – участок двойного бара (а) и участок отмирания (переформирования) двойного бара (б);

7 – участок одиночных языков;

8 – участки ярков, перехлестываемые волнами или затопляемые при высоких уровнях;

9 – осушки, появляющиеся во время стояния низких уровней;

10 – участки перехлестывания Ярков волнами и «прогибания» их береговой линии в сторону лагуны (а) и то же, но с временным образованием прорыв (б);

11 – современный (штормовой) вал, осложнённый конусами заплеска;

12 – границы серий разновозрастных береговых валов;

13, 14 – котловины выдувания различной формы на древних береговых эолово-прибойных валах;

15 – участки, где наиболее часто возникают бугры пучения (а) и конусы заплеска, активно переформируемые ветром (б);

16 – участки возникновения фестонообразных форм подводного микрорельефа (а) и микроконусы выноса мерзлотного генезиса (б);

17 – район, где раньше стояли с. Чичевки (а) и Дагарский маяк (б);

18 – район двойного бара;

19 – участки преимущественного распространения подводных валов;

20 – участки распространения различных форм подводного микрорельефа.

III – третий этап – с 90-х годов XX века по 2015 г.:

1 – Кичеро-Ангарская равнина;

2 – район двойного бара.

Первый этап (до 1961 г.) – это положение территориально целого острова Ярки в естественных – природных условиях. Бар в тот период достигал ширины более 300 м, был значительно выше и имел густую растительность. Высота заросших кустарниками дюн достигала 12 м над урезом воды в озере. Следующий этап (1961–2001 гг.) характеризует период эксплуатации озера Байкал. В результате поднятия уровня и его положения на высоких отметках начался интенсивный размыв бара. Площадь острова стала резко сокращаться. По данным А.А. Рогозина, с 1932 до 1989 г. она уменьшилась на 0,35 км², а по сведениям экологов Северобайкальска в период с 1956 по 2006 г. площадь сократилась почти в три раза. Даже при низких уровнях происходил размыв берегов и переуглубление отмели.

Третий этап в развитии острова охватывает период с 2001 г. по 2015 г. и отражает состояние бара Ярки при регулируемом уровне в диапазоне 1 м и низком положении уровня. При сезонном повышении уровня низкие участки бара Ярки затапливаются. Когда глубина воды над гребнем бара становится близка к соотношению, равному 1,5 высоты волны, ее забурунивание сменяется полным разрушением с формированием прибойного потока, развитием максимальных скоростей и захватом песчаного материала. При таких обстоятельствах происходит снос материала с гребней аккумулятивной формы в подводную часть склона. Вследствие этого тело бара разрушается со стороны озера и перемещается в сторону лагуны. Высота бара снижается. Тело бара, теперь уже разорванных островов, медленно перемещается вверх по склону лагуны, перестраивая профиль подводной и надводной части аккумулятивного тела к изменившимся условиям [Вика и др., 2006]. Развитие абразионно-аккумулятивного типа берега в районе Северного Байкала при сочетании определенных структурно-тектонических условий, природно-климатических особенностей, снижении поступления песчаного материала реками Верхней Ангорой и Кичерой, прямых и опосредованных техногенных нагрузках продолжается.

При нахождении уровня воды в озере на высоких отметках биогенный тип берега подвергается абразионным нагрузкам. Формируются абразионные клифы в торфяниках, затапливаются низкие биогенные берега. Аккумулятивный и биогенный типы берега при высоких уровнях переходят в аккумулятивно-абразионный и биогенно-абразионный подтипы. Такие виды деформаций и переходные разности типов в подтипы берега с абразионной составляющей отмечаются в Чивыркуйском, Баргузинском заливах, Ангарском соре.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

Естественное развитие береговой зоны оз. Байкал с выработкой положения профиля береговых склонов происходило на протяжении миллионов лет, протекая в особых сеймотектонических и геологических условиях со значительной амплитудой колебаний положения палеоуровней воды в водоеме. Длительная история естественного формирования профиля склонов отразилась на последующей относительно быстрой адаптации побережья к новому положению уровня воды в водоеме его техническом регулировании после включения озера в единый гидротехнический каскад.

За период эксплуатации резервуара выделено несколько этапов эволюционного преобразования береговой зоны озера Байкал. Первый этап (1959–1974 гг. XX века) связан с наполнением, высоким положением уровня воды в озере и первым циклом технической эксплуатации водоема и характеризуется нестабильным положением уровня. На этом этапе отмечены максимальные показатели абразионных размывов берегов, интенсивное переформирование профиля равновесия склона (с безвозвратной потерей унаследованных аккумулятивных форм на отдельных участках), активизация экзогенных геологических процессов (оползни, обвалы, солифлюкция, эоловый перенос). Следует отметить, что перестройка профиля береговых склонов проходила стремительно, особенно на участках, сложенных слабыми, неустойчивыми к абразии горными породами.

Второй этап выделен (1974–1995 гг. XX века) как этап активной адаптации геологической среды к заданным эксплуатационным параметрам природно-техногенной системы. Данный этап включает период многолетнего понижения уровня в озере и период эксплуатации со значительной амплитудой колебания воды в резервуаре. Выделены годы высокого положения и годы с низким положением уровня воды. Именно колебание уровня определяло параметры динамики экзогенных процессов и скорость переработки береговых склонов на данном этапе. На этом эксплуатационном этапе были определены участки берега с проявлением наибольших абразионных размывов, которые локализованы в местах с особыми геолого-литологическими, геоморфологическими и геокриологическими условиями береговой зоны.

Третий этап (1995 г. XX века – 1914 г. XXI века) характеризуется относительной стабилизацией абразионного процесса в береговой зоне озера Байкал, что связано с положением уровня воды озера на низких отметках и изменениями его в пределах одного метра.

В настоящее время береговая зона озера Байкал вступила в следующий цикл эволюционного развития, последние годы (с 2014 г.) характеризовались низкими

положениями уровня. Далее было принято решение о технической возможности форсировать уровни воды в озере в пределах 2,31 м до 2020 г.

Таким образом, за период эксплуатации водоема произошла смена экзогеодинамических обстановок в береговой зоне озера, трансформация профиля склона с учетом нового положения уровня воды. Установлено, что динамика абразионного процесса на всех этапах эксплуатации, при прочих равных условиях, контролируется уровенным режимом, имея в современных условиях природно-технический характер. Всплески активизации деформации абразионных типов берега и их подтипов совпадают с периодами высокого положения уровня воды в водоеме. Протяженность локальных участков абразионного подтипа берега не постоянна во времени и может варьироваться от года к году. Участки береговой зоны, где развиты унаследованные аккумулятивные формы, подверглись динамическим преобразованиям (изменения объемов, форм и пространственного положения). Аккумулятивный тип берега в настоящее время продолжает испытывать процессы трансформации, перестройки форм с элементами деструкции, продолжая адаптацию к новым природно-техногенным условиям. Количественные показатели протяженности аккумулятивных подтипов берега не постоянны во времени, протяженность может варьироваться в зависимости от изменения объемов твердого материала, поступившего на участок аккумуляции за сезон, год и цикл в целом, и положения уровня воды в озере Байкал.

В результате составления и анализа Карты типов берегов озера Байкал масштаба 1:2 500 000 установлено, что основные типы берегов имеют следующую протяженность: структурно-абразионные – 717,95 км, абразионные – 906,28 км, аккумулятивные – 421,78 км, техногенные – 28,16 км.

Составленная электронная карта используется как один из слоев интерактивной карты озера Байкал при реализации проекта онлайн-мониторинга состояния природной среды озера, что позволяет на технологически новом уровне систематизировать информацию об изменениях, происходящих в геологической среде береговой зоны, отследить активность экзогенных геологических процессов на прилегающих территориях, оценить общее геоэкологическое состояние берегов уникального озера Байкал.

Глава 4. Алмазоносное месторождение (на примере кимберлитовой трубки Нюрбинской)

Нюрбинская алмазоносная трубка расположена в пределах Накынского кимберлитового поля в центральной части Якутской провинции, Республика Саха (Якутия), Нюрбинский улус (центр г. Нюрба). Разработка Нюрбинского месторождения начата в 2000 г., с бурения глубоких разведочных скважин, детального опробования и анализа литологического разреза, а также с оценки геокриологического состояния горных пород, определением физико-механических свойств вмещающих пород.

4.1. Климатические и инженерно-геологические условия

Климатические условия

Климатические особенности территории определяются ее географическим положением и атмосферной циркуляцией воздушных масс. Над территорией Якутии зимой господствует Сибирский антициклон, устанавливающий на длительное время морозную сухую погоду с частыми бесприпятственными вторжениями с севера холодных воздушных арктических масс, способствующих охлаждению верхней части земной коры. Климат района резко континентальный: небольшие объемы зимних осадков и резкое их повышение в летние периоды года [Дроздов, 2011]. Среднегодовая сумма осадков – 244 мм, из них в теплый период года выпадает 172 мм (май – сентябрь), на остальной период года приходится 72 мм. Наименьшее количество осадков наблюдается с декабря по апрель, в среднем в месяц 8 – 9 мм. Большая доля осадков (до 63 %) выпадает в виде дождей, до трети объема осадков — в виде снега. Снеговой покров появляется в последней декаде сентября. Продолжительность существования устойчивого снегового покрова составляет в среднем 216 дней. Многолетняя среднегодовая температура воздуха составляет $-10,7$ °С. Самый холодный месяц года — январь со средней месячной температурой $-37,9$ °С, самый теплый месяц — июль со средней месячной температурой $+16,3$ °С. Продолжительность безморозного периода в году: средняя — 59 сут, максимальная — 97 сут, минимальная — 44 сут [по данным ГОКа «Нюрбинский»].

Наиболее близко расположенная к Нюрбинскому месторождению метеостанция Чумпурук, демонстрирует, что за последние годы температура воздуха менялась от $+32$ °С летом, до -58 °С зимой (рис. 4.1).

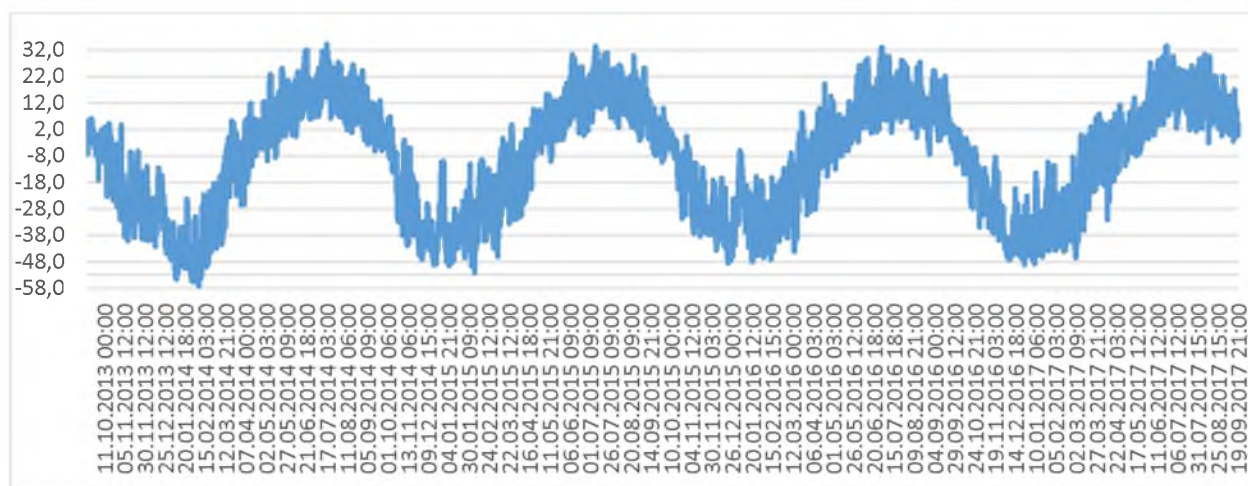


Рисунок 4.1. График температуры воздуха в 2013–2017 гг. (по данным метеостанции Чумпурук, 89 км от пос. Накын).

Изменение температуры поверхности за счет изменения величины радиационного баланса может составлять 1,5–2,0 °С. Солнечная радиация, поступающая на подстилающую поверхность, распределяется неравномерно. Это является причиной различий в микроклимате, глубине сезонного протаивания и формировании температуры поверхности. Характерной особенностью радиационного режима является большая зависимость радиационного баланса от высоты и ориентации склонов. С увеличением абсолютной высоты отраженная радиация (альбедо) возрастает вследствие увеличения продолжительности периода со снежным покровом. Отсутствие снежного покрова способствует поглощению суммарной радиации. Суточные суммы прямой солнечной радиации для склонов северной и южной экспозиции, в зависимости от их крутизны, могут различаться в 2,3 – 2,4 раза [Железняк, 2005].

В районе Накынского кимберлитового поля криогенная толща имеет трёхъярусное строение. Верхний ярус слагают многолетнемерзлые породы, содержащие воду в виде льда, заполняющего поры, каверны, трещины. В осадочных и кимберлитовых породах встречаются цементные и инъекционные генетические типы льда. Зафиксированная мощность чередующихся шлиров цементного льда составляет 1–2 см, иногда достигает 5–10 см. В зонах тектонического дробления осадочного чехла и в кимберлитовых трубках льды заполняли трещины скола и отрыва, многочисленные поры, каверны. Как правило, цементный лед чистый и прозрачный, с небольшим количеством автогенных пузырьков воздуха [Алексеева и др., 2014]. Нижний ярус состоит из охлажденных пород, пустоты которых заполнены солеными водами и рассолами с отрицательной температурой – криопэгами. Промежуточное значение имеет ярус морозных пород [Алексеев, 2000].

Мощность криолитозоны в районе трубки Нюрбинской достигает 740–780 м [Дроздов, 2011].

По геокриологическим данным участок месторождения отнесен к области сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов, Кимберлитовая трубка Нюрбинская в рельефе представляет собой водораздел, где мощность многолетнемерзлых грунтов изменяется от 230 до 380 м. Температурный режим мерзлой толщи имеет прямую связь с температурой земной поверхности. Слой сезонного протаивания представляет собой верхнюю часть слоя годовых колебаний температур. Мощность слоя сезонного протаивания изменяется от 0,2–0,4 до 2–3 м. Температура многолетнемерзлых пород изменяется от –1,0 до –5,8 °С [Дроздов и др., 2008].

Геоморфологические и структурно-геологические условия

Кимберлитовая трубка расположена в среднем течении реки Мархи, в верховьях ручья Дюлюнг-Оту (правый приток реки Накын). Трубка Нюрбинская расположена на пологом склоне юго-восточной экспозиции, осложненном мелкими ложками, глубина которых не превышает 1,5–2,0 м, ширина 200 м. В геоморфологическом отношении это район Вилюйско-Мархинской денудационной равнины, представляющей пологоволнистое слаборасчлененное плато с широкими плоскими водоразделами и пологими склонами. Абсолютные отметки дневной поверхности участка колеблются от 259,5 м, в северной части месторождения до 242 м, в его юго-восточной части, закономерно понижаясь с северо-запада на юго-восток с градиентом 15–30 м, перепады высот в пределах участка незначительны [Алексеева и др., 2014].

Месторождение приурочено к пересечению разноориентированных глубинных разломов Вилюйско-Мархинской зоны, имеющей северо-восточное (45–50°) простирание и крутое (до вертикального) падение на юго-восток, и Средне-Мархинской зоны, имеющей северо западную ориентировку.

Фрагментами Вилюйско-Мархинской зоны являются: Ботуобинский (пересекающий трубку Нюрбинскую) и Дьяхтарский (вдоль трубки Ботуобинской) рудоконтролирующие разломы. Рудовмещающей структурой служит Диагональный разлом северо-восточной (20–30°) ориентировки, который подтвержден слабоконтрастными магнитными аномалиями (рис. 4.2).



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Юрская система Накынский отдел Толуэстийский ярус		Лугская свита - песчаники, гравий, алевролиты, аргиллиты, линзы конгломератов	Лицензионная площадь ЯКУ №01450КЗ на право пользования недрами с целевым назначением геологического изучения и добычи алмазов на коренном месторождении трубка Нюрбинская и генетически связанной с ней месторождении россыли Нюрбинская Лицензионная площадь ЯКУ №01451КЗ на право пользования недрами для геологического изучения и добычи алмазов на месторождении трубка Ботубинская в пределах участка недр в бассейне ручья Дьяхтар-Юргаз, левого притока р. Марха Контур участка №3 объект Россилийной Лицензионная площадь ЯКУ №15159КЗ на право пользования недрами для разведки и добычи коренных алмазов на месторождении Майское Месторождения и проявления полезных ископаемых Разведанные коренные месторождения алмазов с промышленными запасами: а - средние (тр. Нюрбинская, Ботубинская), б - малые (м-е Майское) Коренные проявления алмазов недостаточно изученные
		Четвертичная галечка - алевропесчанники тонкозернистые	
		Третья галечка - алевролиты крупнозернистые, известковые стяжения	
		Вторая галечка - алевролиты глинистые, известковые стяжения	
		Первая галечка - алевролиты глинистые, известковые стяжения	
Суперпалеозойская свита		Суперпалеозойская свита нерасчлененная - аргиллиты, алевролиты, алевропесчанники, известковые стяжения (только на разрезах)	
	Среднепалеозойские интрузивные образования		
Накынский массив		Кимберлитовые тела (трубки, жилы), скрытые под мезозой образованиями (алмазоносны): а - на карте, б - на разрезах	
		Дайки долеритов и субциалочных базитов, скрытые под мезозойскими образованиями	
Байгалско-Мархинский комплекс			

Рисунок 4.2. Обзорная структурно-геологическая карта М. 1:50 000 Накынского кимберлитового поля (по материалам Нюрбинского ГОКа).

Трубка «Нюрбинская» локализована в узле пересечения разломных зон субширотного, север-северо-восточного и северо-восточного направлений. Ее

формирование происходило в результате двух этапов знакопеременных сдвиговых движений в палеозое с последующей активизацией в мезозое [Кошкарев и др., 2011].

В геологическом строении участка месторождения принимают участие верхнекембрийские (мархинская и моркокинская свиты) и ордовикские (олдондинская свита) терригенные, терригенно-карбонатные породы (см. рис. 1.2., Глава 1), являющиеся вмещающими для кимберлитовых трубок. Перекрывающие породы сложены триасовыми (дыхтарская толща), нижнеюрскими (орухтаская, тюнгская и сунтарская свиты) и среднеюрскими (якутская свита) терригенными отложениями. Общая мощность перекрывающих мезозойских пород колеблется от 56 до 102 м над трубкой Нюрбинской (рис. 4.3).

СИСТЕМА	ОТДЕЛ	ЯРУС	ИНДЕКС	КОЛОНКА	МОЩНОСТЬ, м	ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД	
ЮРСКАЯ		АВЛЕНСКИЙ	J _{jak}		>19	Якутская свита. Песчаники и пески серые, алевролиты с фрагментами микрофауны, линзы конгломератов	
		ТОАРСКИЙ	J _{sn⁴}		16-20	СУНТАРСКАЯ СВИТА Четвертая пачка. Алевропесчаники темно-зеленые тонкозернистые, алевролиты с фрагментами криноидей	
			J _{sn³}		10-14		Третья пачка. Алевролиты темно-серые крупнозернистые
			J _{sn²}		12-18		Вторая пачка. Алевролиты темно-серые с известковыми стяжениями
			J _{sn¹}		3-15		Первая пачка. Аргиллиты зеленовато-серые тонкослоистые
		ЦЕЛИНСЬКАХСКИЙ	J _{tn}		3-8	Верхний подъярус. Тюнгская свита. Алевропесчаники с гальками	
			J _{or}		до 40	Орухтаская свита. Алевролиты серые разномзернистые, углистые алевролиты и аргиллиты, прослой кварцевых песков, линзы и прослой гравелитов и конгломератов в основании	
		СИНЕ-МОРСКИЙ					
		ТЕТАН-СКИЙ					
		ТРИАСОВАЯ	ВЕРХНИЙ РЕТСКИЙ		J _{7-1'дл}		до 70

Рисунок 4.3. Стратиграфическая колонка перекрывающих отложений (по данным Нюрбинского ГОКа).

Четвертичные элювиально-делювиальные образования повсеместно распространены в верхней части вертикального разреза. Над северной частью трубки «Нюрбинской» и к западу, северо-западу распространены супеси и суглинки мощностью 0,5–1,2 м. Над южной частью трубки и к юго-востоку от нее – илистые суглинки

(мощностью 1,0–2,2 м) с незначительным количеством гальки и гравия кремней, кварцитов.

Средненижнеюрские осадочные образования, залегающие над трубкой Нюрбинской, имеют суммарную мощность от 56 до 65 м. Они характеризуются исключительной выдержанностью и однотипностью строения, основных петрофизических параметров с закономерными вариациями литологического состава в вертикальном направлении. Над трубкой Нюрбинской и вблизи ее денудацией уничтожены якутская свита и верхи разреза сунтарской свиты юры. Мощности пород укугутской свиты в пределах карьера трубки Нюрбинской изменяются от 1,3 до 2,0 м. Дяхтарская толща над рудным телом сформирована из делювиальных шлейфов интенсивно выветрелых кимберлитов и карбонатных пород, занимающих ограниченное пространство у флангов кимберлитового тела трубки. Скважинами фиксируются окончания палеодепрессий над контактами трубки с вмещающими породами. Только на южном фланге дяхтарские образования в небольшом объеме перекрывают трубку. Палеодепрессии радиально расходятся от краевых частей кровли рудного тела, протягиваясь за пределы его границ с породами нижнего палеозоя. При этом мощность пород дяхтарской толщи, выполняющих палеодепрессии, достигает 4–5 м, реже 12 м над трубкой. За пределами трубки продолжения палеодепрессий в плане дугообразно окаймляют рудное тело с запада и юго-востока, соединяясь в крупное понижение вблизи южного фланга. Палеодепрессии выполнены материалом ближнего сноса: делювиальными и пролювиальными образованиями за пределами рудного тела участка – брекчиями обрушения. Породы, выполняющие палеодепрессии, представлены несортированными слабосцементированными алевролитами глинистыми и глинами алевритистыми с различным количеством обломков выветрелых карбонатных и терригенных пород (по материалам Нюрбинского ГОКа).

Повсеместно кимберлиты и карбонатные породы перекрыты остаточными корами выветривания (T_{2-3}). Данные образования в пределах развития пород нижнего палеозоя разделяются на две зоны: верхнюю делювиальную и нижнюю элювиальную. Породы верхней зоны представлены алевритистыми декарбонатизированными глинами с дресвой, щебнем и мелкими валунами интенсивно выветрелых карбонатных пород, маршаллитизированных кремнистых пород с примесью терригенного материала. Нижняя зона представлена крупноглыбовой в различной степени декарбонатизированной брекчией карбонатных пород, сцементированной дресвяно-щебнисто-глинистым материалом. Мощность верхнего слоя изменяется от 1 до 5–6 м, элювиального слоя – от 3 до 8–10 м, в наиболее трещиноватых породах достигает 25–30 м. Средняя мощность коры

выветривания составляет 10 м. Породы коры выветривания повсеместно сильнотрещиноваты (от 10–15 до >100 на 1 м) (согласно данным Нюрбинского ГОКа).

В генерализированном плане разрез перекрывающих терригенно-карбонатных пород представлен переслаиванием разновидностей алевролитов, известняков, доломитов в разных пропорциях с подчиненным количеством песчаников, мергелей и аргиллитов. Разрезы скважин в пределах участка хорошо коррелируются с другими скважинами, пройденными в пределах трубки Нюрбинская ранее. По прочностным свойствам перекрывающие мезозойские отложения малопрочные: пониженной, низкой и очень низкой прочности, сопротивление одноосному сжатию изменяется от 1 до 20–30 МПа. Самыми слабыми породами являются мезозойские глины алевролитистые, глины карбонатные с обломками карбонатных пород, песчаники алевролитистые (Приложение 9).

Юрские отложения (J_{1-2}) представлены песчаниками, глинистыми алевролитами, щебнисто-глинистыми образованиями карстового генезиса. Влажность пород (W) высокая – до 9 %, при средней величине 7,1 % . Пористость пород повышенная – до 31,1 %. Средняя плотность пород 2,67 г/см³; объемный вес – 1,84 г/см³. Породы малопрочные: предел прочности при одноосном сжатии ($\delta_{сж}$) не превышает 9,65 МПа, средняя величина предела прочности при одноосном растяжении – ($\delta_{р}$) 0,44 МПа. Условное сцепление – не более 3,92 МПа.

Коры выветривания (T_{2-3}) представлены глиной карбонатной пучинистой с прослойками доломитов. Мощность отложений может достигать 7,9 м (по материалам Нюрбинского ГОКа).

Вмещающая толща кимберлитовой трубки Нюрбинской характеризуется неравномерной и разноориентированной трещиноватостью, с повышенной плотностью (до 20–30 трещин на 1 пог.м) в околотрубочном пространстве по всем без исключения разностям. До глубины 130–140 м как в рудном теле, так и во вмещающих его породах часто встречаются открытые трещины, выполненные льдом. Ниже преобладают закрытые трещины.

Юрские перекрывающие отложения имеют высокую трещиноватость (5–10 трещин на 1 пог.м), трещины прямолинейные, волнистые, извилистые, разноориентированные, чаще субгоризонтальные. В перекрывающих отложениях по разрезу в интервале глубин 7–52 м преобладают литологические трещины напластования шириной 0,2–0,5, иногда 2 см. В отдельных пачках фиксируются тектонические трещины отрыва. Их углы падения изменяются от 45 до 90°, ширина не превышает 0,2–0,8 см. Породам свойственны трещиноватые и пластово-трещинные полновыраженные криогенные текстуры. Весовая влажность составляет 7–8 % [Алексеев и др., 2011]. В

интервале от 40 до 50 м залегает пачка аргиллитов, отложения которой характеризуются повышенной трещиноватостью. Горные породы имеют тонкослоистую текстуру и при оттаивании расщепляются по многочисленным горизонтальным трещинам отдельности на мелкие плитки толщиной от первых миллиметров до 10 см (по материалам Нюрбинского ГОКа).

Схема разломно-блокового строения трубки Нюрбинской представляет проекцию плоскостей разрывных нарушений и демонстрирует степень раздробленности горного массива (рис. 4.4).

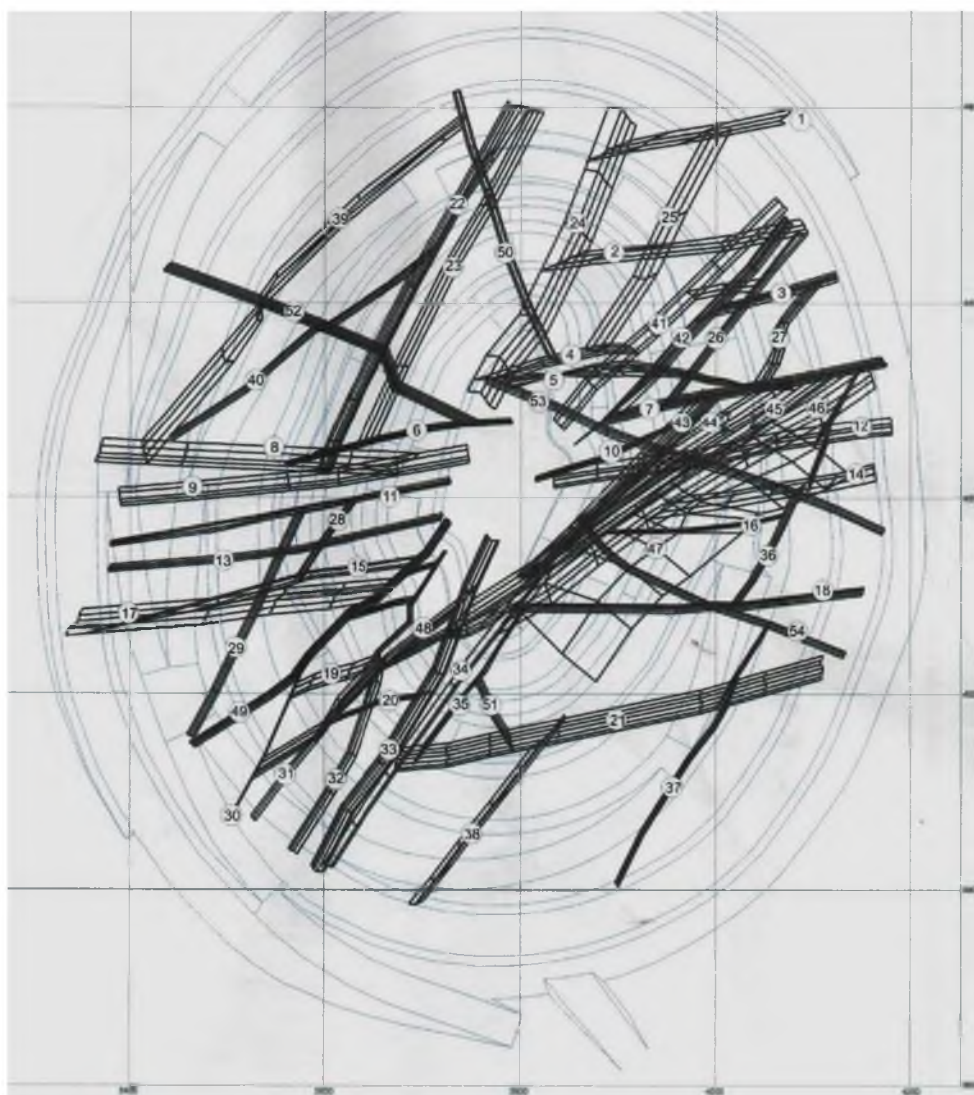


Рисунок 4.4. Схема разломно-блокового строения горного массива в пределах карьера «Нюрбинский» (номера – проекции на дневную поверхность субвертикальных нарушений) (по данным работ ИЗК СО РАН).

Самыми многочисленными являются субширотные нарушения (№ 1–№ 21). Чаще всего это зоны повышенной трещиноватости, иногда дробления, реже наблюдаются зоны брекчирования мощностью первые метры. Наибольшее количество субширотных

нарушений наблюдалось в центральной части участка, где в пределах западного и восточного бортов на отрезке протяженностью 200–250 м отмечены выходы 7–8 субпараллельных зон субширотного простирания.

Следующими по количеству зафиксированных являются нарушения север-северо-восточного простирания (№ 22–№38). Чаще всего это зоны повышенной трещиноватости. Север-северо-восточные разрывные нарушения образуют ступенчатость шириной порядка 200 м.

Северо-восточные нарушения (№ 41–49) проявлены главным образом к юго-западу от южного и восточного контактов рудного тела. Нарушение № 47 с падением на северо-запад под углом 25–45° расположено диагонально относительно простирания борта. Нарушения север-западного и север-северо-западного простирания (№ 50–54) представлены зонами повышенной трещиноватости (по данным Нюрбинского ГОКа).

По результатам инженерно-геологических исследований керна скважины ИГС-20, расположенной на юго-восточном сегменте борта карьера, выявлены зеркала скольжения в интервалах глубин 20–30 м (рис. 4.5).

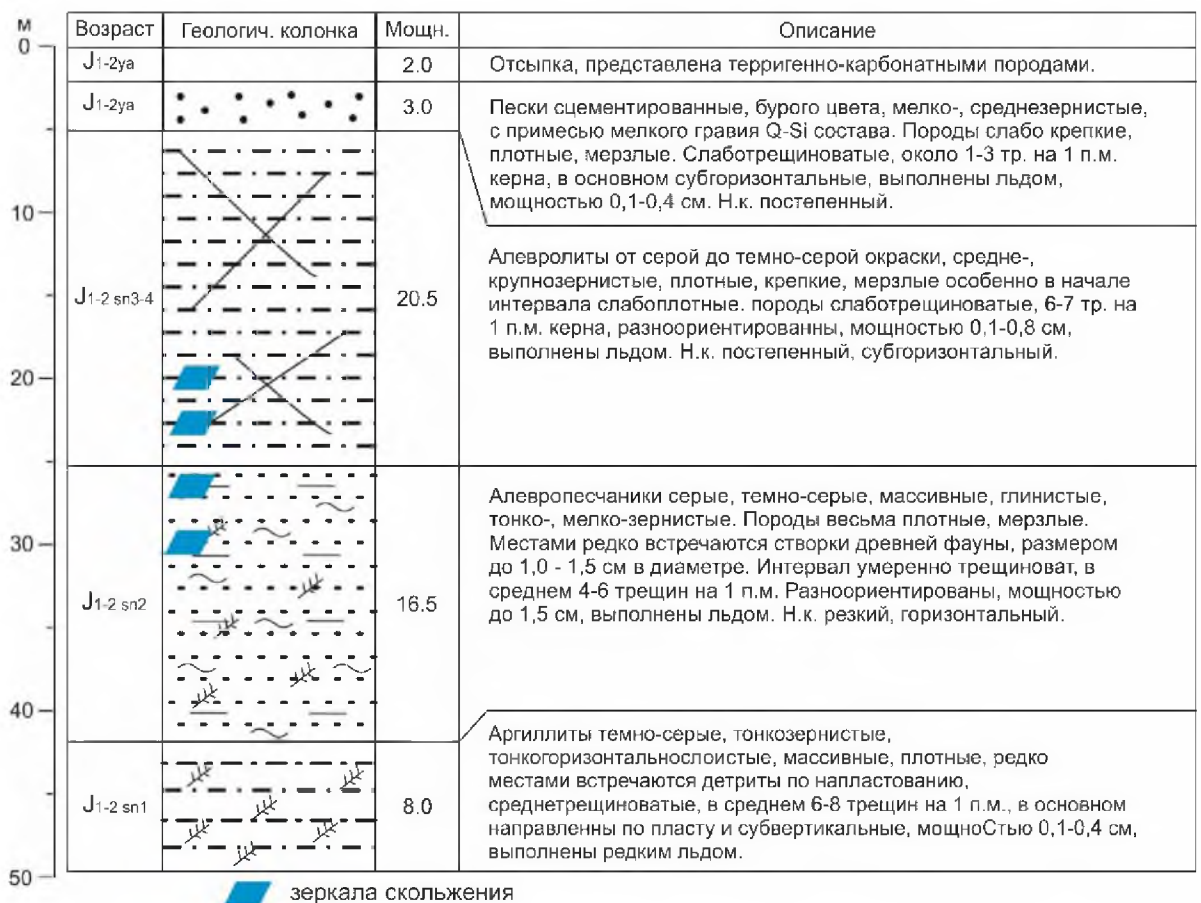


Рисунок 4.5. Геологический разрез (скважина ИГС-20), вертикальный масштаб 1:500 (построено по данным бурения Нюрбинского ГОКа).

Верхняя часть разреза до глубины 13 м, включающая пески и алевролиты, имеет сетчатую текстуру с тонкими прослоями льда. При переходе в талое состояние образцы приобретают пластичное состояние. Ниже по разрезу до глубины 23–24 м керн имеет слоистую текстуру. С 25 м грунты льдистые, сетчатой криотекстуры. Трещины шириной 1–2 см выполнены льдом. Отмечены следы течения, горизонтальные пластические деформации с замятиями грунта (рис. 4.6, *А*). По керну в интервале глубин 26–27 м обнаружены хорошо выраженные вертикальные трещины (рис. 4.6, *Б*).



А

Б

Рисунок 4.6. Керн: *А* – следы горизонтального течения в керне *Б* – вертикальная трещина отрыва (зона смещения).

Трещиноватость горных пород прослеживается по всему разрезу и периметру карьера в перекрывающих юрских отложениях. Горизонтальная трещиноватость связана с литологическими особенностями формирования перекрывающей толщи терригенных и терригенно-карбонатных отложений, вертикальная трещиноватость сформирована зонами разломов, дробления, ослабленных трещинных зон.

Трубка Нюрбинская расположена в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород и по соотношению подземных вод и многолетнемерзлых пород в районе выделяются воды трех типов: надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные. В формировании инженерно-геологических условий, определяющих состояние верхней части разреза, сложенной мезозойскими отложениями, участие принимают надмерзлотные и межмерзлотные воды.

Региональным водоупором для вод является поверхность многолетнемерзлых пород. Надмерзлотные воды залегают и циркулируют в четвертичных аллювиальных склоновых и элювиальных отложениях и представляют собой пространственный поток со свободной поверхностью. Питание надмерзлотных вод происходит за счет инфильтрации

атмосферных осадков и оттаивания мерзлых льдистых отложений. По химическому составу воды близки к атмосферным осадкам. Воды ультрапресные с минерализацией от 0,05 до 0,29 г/л, по составу гидрокарбонатные натриевые, кальциево-магниевые, реже магниевые-кальциевые. В пределах месторождения минерализация увеличивается (до 0,7 г/л) (по материалам Нюрбинского ГОКа).

Межмерзлотные воды вскрываются в юрских и верхнекембрийских отложениях. Они встречаются в двух фазах: твердой (лед) и жидкой (рассолы). Результаты химических анализов льда указывают на то, что он сформирован за счет вод гидрокарбонатного хлоридного магниевое-кальциевого состава. Для образования подземных льдов в осадочных отложениях необходимо, чтобы породы до начала промерзания содержали воды, способные кристаллизоваться в условиях естественного охлаждения. Отмечены два генетических типа подземных льдов: цементные и инъекционные подземные. Цементные подземные льды сформировались за счет свободных подземных вод, проникших до глубины 250 м и более. Кристаллизация воды в открытых системах не меняла размеров трещин, а в условиях закрытой системы увеличила их на 9 %. В осадочных породах с ненарушенным залеганием цементные подземные льды сформировались в горизонтальных и слабонаклонных трещинах напластования. Мощность чередующихся шпиров достигает 1–2 см, иногда 5–10 см. Цементный лед, как правило, чистый, прозрачный, с небольшим количеством пузырьков. Формирование инъекционных подземных льдов происходит в результате внедрения вод под напором в промерзающие или мерзлые горные породы. Условия формирования инъекционных льдов существовали в зонах тектонического дробления осадочных пород и в пределах кимберлитовой трубки [Алексеева и др., 2014].

В пределах вскрываемых криогенных толщ горные породы мерзлые и морозные. Криогенные текстуры массивные, трещинно-прожилковые, трещинно-жилвные. В кавернозных известняках и доломитах лёд заполняет пустоты, в мергелях и аргиллитах фиксируется в виде тонких прослоек и линз. Льдистость отложений верхней части разреза достигает 20 %, с глубиной снижается до 2 % (по данным Нюрбинского ГОКа).

Особенности открытой разработки месторождения алмазов

Разработка кимберлитового месторождения ведется карьерным способом, горные работы осуществляются ОАО "АЛРОСА-Нюрба".

Целью вскрытия карьерного поля является создание транспортной связи рабочих горизонтов с пунктами приема и перегрузки горной массы в карьере и на поверхности. Строительство карьера осуществлялось до 1.07.2003 г. Карьерное пространство разделено

на горизонтальные слои-уступы для планомерного удаления из недр горной массы. Отработку горизонтов ведут последовательно сверху вниз. В соответствии с технологией ведения горных работ на карьере высота рабочего горизонта принята равной 15 м, с отработкой подступами высотой 7,5 м. При работе в рыхлых породах минимальную ширину рабочей площадки принимают равной сумме ширины транспортной бермы и призмы обрушения; для условий карьера трубки Нюрбинской – 30 м.

Рассматриваемые в работе конструктивные элементы борта карьера включают (термины по [Козловский, Агошков, 1987]):

- борт карьера – боковые поверхности карьера, имеющие ступенчатую или уступную форму;

- уступ – часть толщи горных пород в карьере, имеющая горизонтальную рабочую поверхность в форме ступени. Уступ характеризуется высотной отметкой (горизонт). Уступ имеет нижнюю, верхнюю площадки, откос и бровку. Горизонтальная поверхность рабочего уступа, на которой расположено основное оборудование, называется рабочей площадкой;

- берма – площадка, на которой работа не производится. Различают предохранительные бермы, транспортные (соединительные) бермы и бермы очистки. Транспортные бермы служат для расположения транспортных путей, по которым осуществляется грузотранспортная связь между рабочими площадками в карьере и поверхностью. Предохранительные бермы предназначены для повышения устойчивости борта и для задержки обломков породы, обрушающихся при выветривании уступов;

откос уступа – наклонная поверхность, ограничивающая уступ со стороны выработанного пространства.

Вследствие естественного осыпания откосов происходит заполнение предохранительных и транспортных берм обломочным материалом горных пород. Предусматривается периодическая зачистка предохранительных берм, которая производится механизированным способом с применением бульдозеров.

В соответствии с рекомендациями лаборатории геомеханики института "Якутнипроалмаз", карьер в отработанном виде имеет следующие проектные параметры: до поверхности (+160 м) высота уступа составляет 15 м, с углом откоса 35° . Заложение угла в перекрывающих отложениях принимается согласно углу естественного откоса слабосцементированных горных пород. Нижние горизонты (ниже +160 м) высота уступов достигает 45 м, с углом откоса в 75° и 50 м с углом откоса 80° . Во вмещающих прочных породах постановка уступов в предельное положение производится по традиционной для карьеров АК "АЛРОСА" технологии с предварительным щелеобразованием путем

страивания 15-метровых подступов ($H_y = 45$ м). Проектная глубина карьера «Нюрбинский» – 450 м. На начало 2018 года глубина карьера составляла 337 м. Размеры карьера по поверхности – 1945×1050 м, по дну – 324×105 м (рис. 4.7). Срок отработки карьера – 23 года (<http://www.alrosa.ru>).

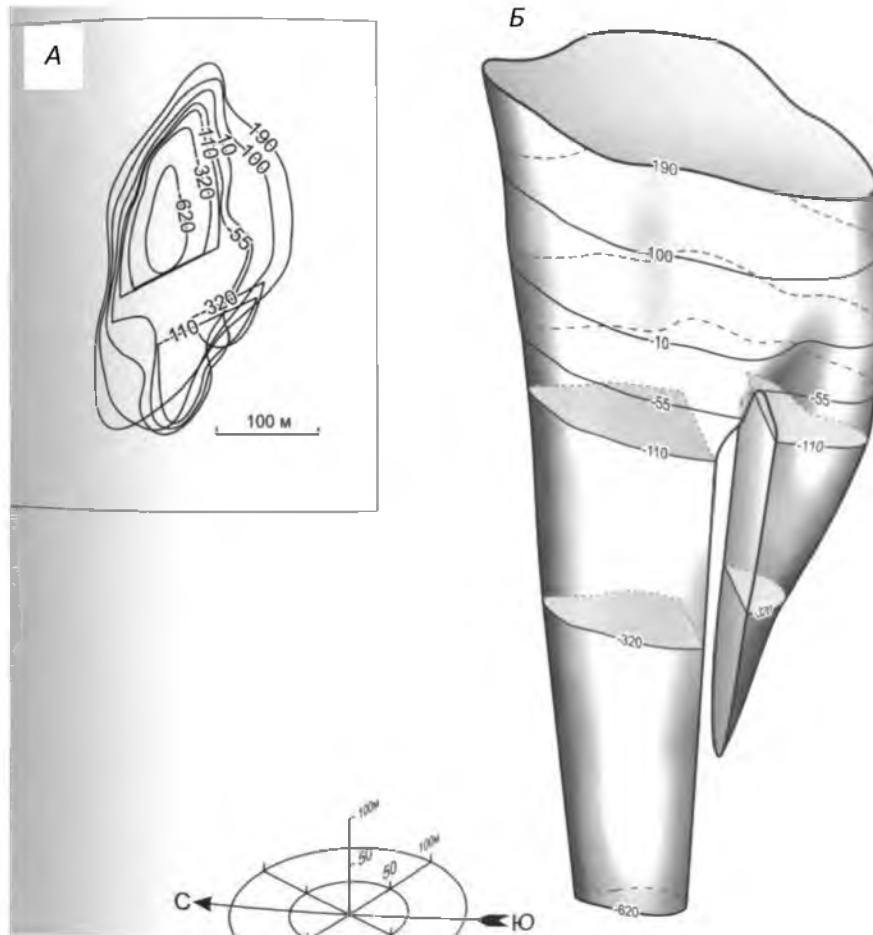


Рисунок 4.7. Кимберлитовая трубка Нюрбинская. *А* – совмещенный погоризонтальный план эруптивного контакта; *Б* – трехмерное изображение, вид на восток [Костровицкий и др., 2015].

Для первого этапа разработки карьера характерен самый большой объем земляных работ в составе горных по запуску промышленной разработки месторождения алмазов. Проведена планировка территории, снят слой горных пород, перекрывающих кимберлитовую трубку. Сформированы конструктивные элементы борта карьера в мезозойских перекрывающих отложениях. Определены и организованы площадки для хранения вскрышных горных пород (отвалы/терриконы), создана транспортная сеть дорог и инфраструктура площадки карьера (прибортовая территория +250-го горизонта).

Для защиты карьера от водопритоков с дневной поверхности карьера на период эксплуатации предусмотрена система нагорных канав с общей ориентацией стока воды в восточном направлении.

Карьерная вода, подлежащая отведению, представлена поверхностными водами и атмосферными осадками, поступающими с водосборной площади карьера, а также подземными минерализованными водами. Схема карьерного водоотлива предусматривает разделение поступающих в карьер минерализованных и поверхностных вод и выглядит следующим образом. Поверхностный сток собирается системой канав на бортах карьера, расположенных на предохранительных и транспортных бермах, в зумпф (горизонт +85 м), откуда по водоводу перекачивается в северо-восточную нагорную канаву. Минерализованная вода в летний период с нижних отметок откачивается насосными станциями, в зимний период вывозится специальными машинами на полигон захоронения дренажных вод (согласно данным Нюрбинского ГОКа).

Особенность карьера при разработке Накынского месторождения состоит в том, что верхние горизонты карьера находятся на контакте со слаболитифицированными осадочными отложениями, представленными песчаниками, аргиллитами и алевролитами, глинистыми корами выветривания. В отличие от других месторождений борта карьера Нюрбинский до глубины 102 м сложены слабыми, неустойчивыми к процессам выветривания осадочными горными породами, в которых проявляют активное развитие экзогенные геологические процессы. Ниже рассматриваются конструктивные элементы борта карьера (+250-й горизонт), уступы +220, +190, +175-го горизонтов, по мощности соответствующие перекрывающим мезозойским отложениям.

4.2. Экзогенные геологические процессы на бортах карьера

Созданная природно-техническая система по разработке месторождения отличается высокой динамичностью, постоянным преобразованием компонентов геологической среды в ходе эксплуатации – подрезка склонов, расширение площадок, формирование транспортной системы, углубление карьера, организация водоотводящих нагорных канав и т.д. Эволюционные преобразования геологической среды при формировании и эксплуатации природно-технической системы – карьера в условиях криолитозоны – сопровождаются трансформацией геокриологических условий, развитием экзогенных геологических процессов.

Развитие экзогенных геологических процессов, их проявления в пределах борта карьера демонстрируют изменения тех свойств системы, которые определяют ее структуру (геологическое, гидрогеологическое строение и геоморфологический облик), а

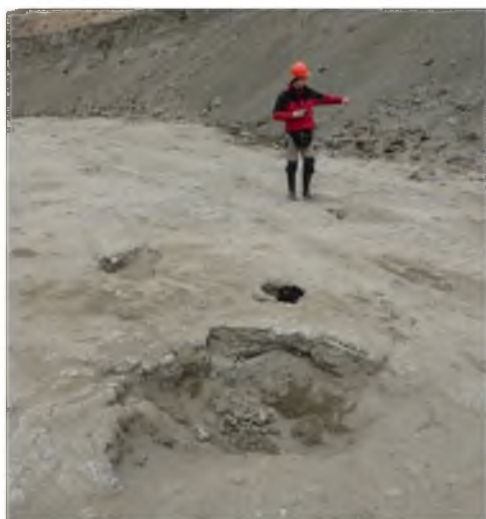
также совокупность ее свойств (напряженное состояние) и частных параметров элементов системы (снижение прочностных свойств грунтов). В результате разработки месторождения карьерным способом на конструктивных элементах бортах карьера получают развитие гравитационные, эрозионные, оползневые процессы. Показатели динамики процессов – важный критерий в оценке эволюционной направленности геологической среды, а также основа контроля стабильной и безопасной работы предприятия.

Обвалы, осыпи

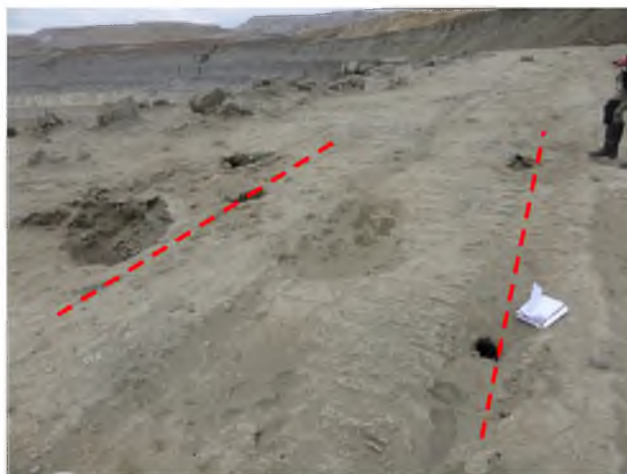
В пределах вновь сформированных конструктивных элементов карьера происходит протаивание мерзлых пород, вскрытых бортами карьера, вытаивание льдистых включений. Процессы протаивания мерзлых пород активно проходили на первых этапах формирования бортов и уступов, непосредственно после подрезки склона. Несколько первых лет горные породы были интенсивно увлажнены, отмечалось оплывание переувлажненного грунта. После протаивания уступов и их осушения стало происходить более активное проникновение агентов выветривания в глубь массива. Активизировался процесс выветривания. В результате произошло раскрытие тектонических и литологических трещин в пределах уступов, ослабленных зон на бермах, бровках и откосах. На откосах стали развиваться гравитационные процессы, на горизонтальных поверхностях берм проявляться просадки, провалы, раскрытие трещин с поглощением поверхностных вод.

Трещины на бермах имеют различные размеры, в основном до 1,0 м по протяженности, ширина раскрытия до 0,3 м, видимая глубина до 0,8 м. Трещины протягиваются как параллельно, так и перпендикулярно бортам карьера. Трещины и просадки, провалы в основании откосов, параметры отдельных форм достигают $0,30 \times 0,22 \times 0,15$ м; $0,80 \times 0,43 \times 0,26$ м (рис. 4.8).

А



Б



В*Г*

Рисунок 4.8. Просадка (*А*); трещины вдоль борта карьера (*Б*); провал (*В*); зона просадок вкрест простирания уступа +220-ого горизонта (*Г*).

На вертикальных поверхностях откосов хорошо маркируются зоны региональной тектонической трещиноватости горных пород. Зоны трещиноватых горных пород частично заполнены обломочным материалом и уходят своими плоскостями в глубину массива (рис. 4.9). Происходит раскрытие трещин.

А*Б*

Рисунок 4.9. Вертикальная трещина на поверхности откоса (*А*); хорошо выраженная зона трещиноватости горных пород в откосе (*Б*) +220-й горизонт.

Практика показывает, что при разработке открытых горных выработок профиль откоса в процессе эксплуатации карьера приобретает угол наклона в соответствии с

показателем угла естественного откоса горных пород, слагающих массив. Поскольку верхняя часть карьера «Нюрбинский» сложена осадочными породами мезозоя, в пределах верхней части борта карьера активно развиваются гравитационные процессы – обвалы, вывалы отдельных крупных блоков, осыпи, оползни. Гравитационные процессы закономерно сопровождают этап формирования откосов берм.

Факты проявления свежих вывалов крупных блоков отмечались по периметру карьера в период до 2013–2015 гг. Зафиксированные размеры обрушившихся блоков на берму составили: № 1 – $1,70 \times 1,17 \times 0,55$ м; № 2 – $0,80 \times 0,70 \times 0,75$ м; № 3 – $0,64 \times 0,56 \times 1,50$ м; обвалившиеся блоки с острыми углами слабовыветрелы (рис. 4.10).

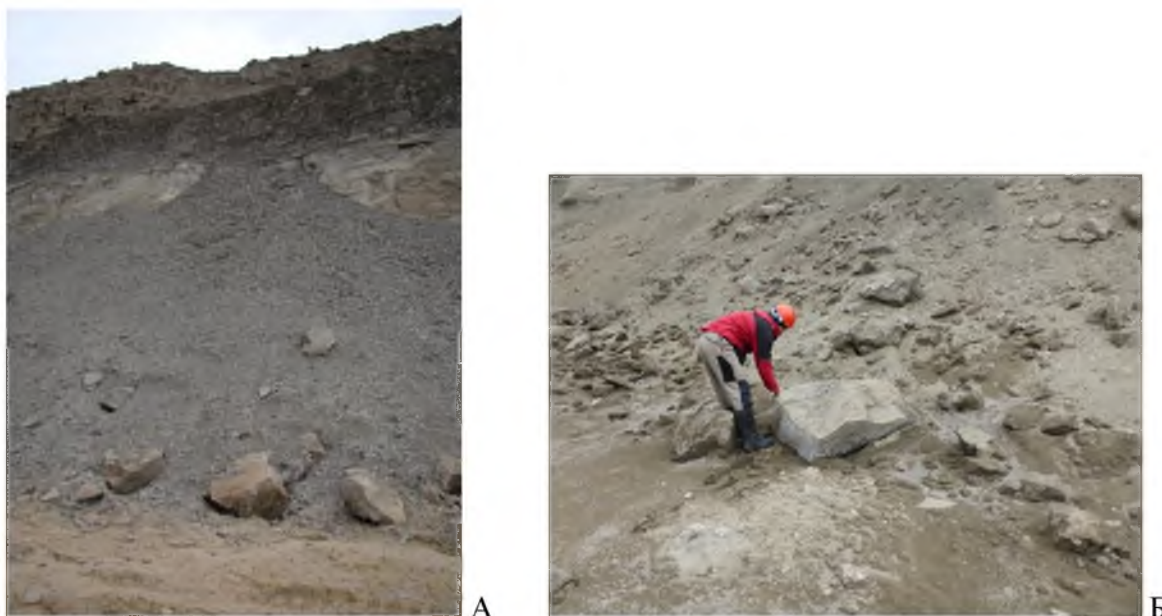


Рисунок 4.10. *А* – осыпь и вывалы крупных блоков (+190-й горизонт); *Б* – обвал крупных блоков горной породы (+220-й горизонт).

Уступы имеют высокую раздробленность трещинами как тектонической, литолого-генетической основы, так и дополнительного интенсивного техногенного воздействия – в результате буровзрывных работ при вскрыше горизонтов. Так, бровка +220-го горизонта, при обследовании 2013 года имела высокую раздробленность, сформировался нависающий карниз, в результате формирования трещин отпора часть горных пород впоследствии обрушилась на нижележащую берму +205-го горизонта, а часть обломков достигла широкой бермы +190-го горизонта (рис. 4.11).



Рисунок 4.11. Панорамный снимок уступов +220, +205 и +190-го горизонтов с нависающими блоками горной породы на бровке +220-го горизонта (фото 2013 г.).

На откосах уступов формируются осыпи, перекрывая откос. При обследовании 2013 года осыпи на отдельных участках 220-го горизонта борта карьера перекрывали на $1/3$ высоту откоса, а в дальнейшем высота осыпей выросла и составила уже $2/3$ откоса. К обследованию 2018 года отдельные участки с осыпями слились с такими же формами нижних горизонтов. Так, например, на юго-восточном сегменте борта карьера, осыпи трех уступов горизонтов +200, +205 и +190-го горизонтов превратились в единую крупную осыпь (рис. 4.12).



Рисунок 4.12. Единый шлейф осыпей в юго-восточной части карьера (фото 2018 г.).

Водная эрозия

При проникновении в карьер поверхностных вод локально развиваются эрозионные процессы, формируя эрозионные промоины, борозды, конусы выноса тонкодисперсного материала (рис. 4.13).

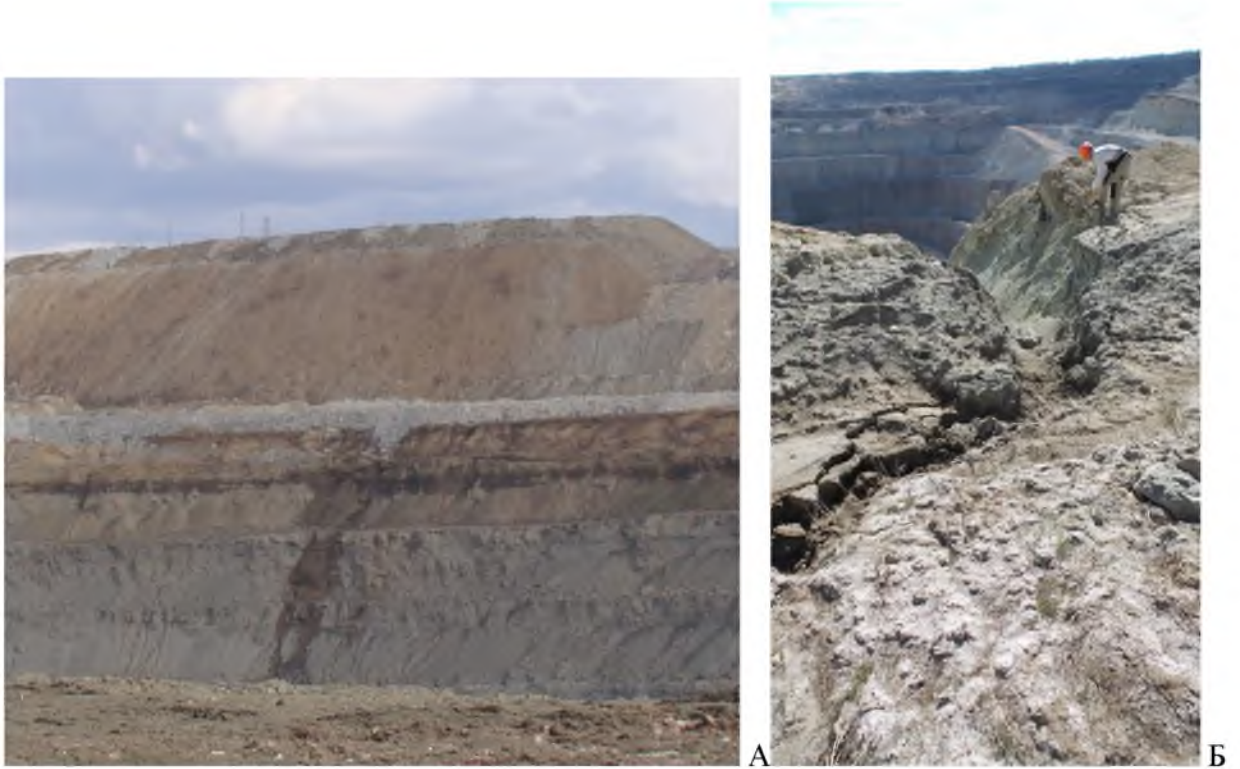


Рисунок 4.13. Проникновение поверхностных вод в карьер (А), активная эрозионная форма (Б).

Поступающий с верхних горизонтов карьера водный поток может иметь открытый водоток, а может поглощаться трещинами горных пород, фильтроваться на нижние горизонты, приводя к переувлажнению уступов карьера на нескольких горизонтах (рис. 4.14).

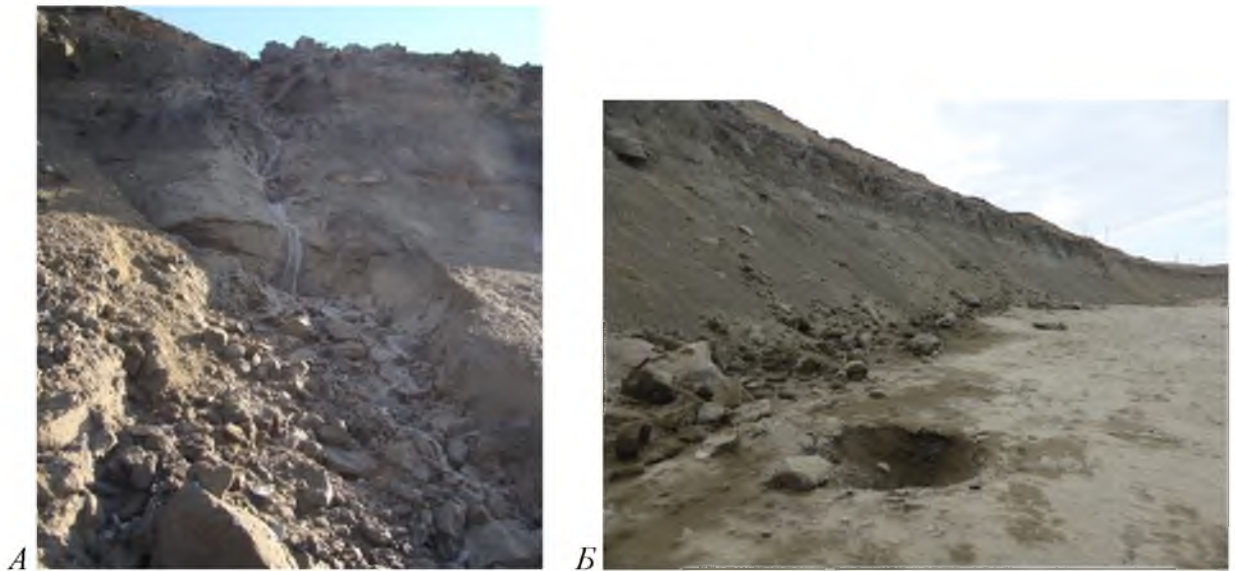


Рисунок 4.14. *А* – открытый временный водный поток; *Б* – ворона с поглощением поверхностных вод

Пик активности эрозионного процесса приходится на период снеготаяния и выпадения интенсивных жидких осадков – весну и первую декаду лета. Водные потоки размывают шлейф осыпных отложений, вымывают мелкозернистый материал и формируют крупные конусы выноса на поверхности бермы (рис. 4.15). Как правило, поверхностный водоток пересекает несколько уступов борта карьера.



Рисунок 4.15. Эрозионная форма и крупный конус выноса, северный борт карьера на +220-м горизонте.

Оползни

В силу особенностей литологического состава горных пород, слагающих массив карьера «Нюрбинский», имеется возможность развития оползней, причем как крупных – глубоких медленного смещения, так и мелких – поверхностных, смещение которых происходит одновременно.

Наиболее активное проявление поверхностных оползней отмечено в северной части борта карьера. На поверхности 190-го горизонта оползневые деформации проявляются в виде циркообразной стенки срыва протяженностью 38 м. Вдоль стенки срыва формируются новые трещины отрыва, ширина свежих блоков около 0,4 м (рис. 4.16).



Рисунок 4.16. Оползень, захвативший +190, +175-й горизонты, перекрыл берму +160-го горизонта (фото 2018 г.).

Причиной формирования поверхностных оползневых деформаций на локальном участке северного борта карьера является наличие в разрезе переувлажненных юрских аргиллитов, алевролитов и глин кор выветривания. Дополнительное увлажнение горных пород происходит вследствие проникновения поверхностных вод в карьер по эрозионным формам. Практически по центру оползневого цирка зафиксирована эрозионная форма – промоина, которая увлажняет склон, приводит к потере устойчивости склона и смещению пород по оползневому механизму (рис. 4.17). Площадь оползневых деформаций на участке составляет 1154 м², объем сместившихся масс грунта – 1731 м³, отступление по поверхности бермы составило более 7 м.

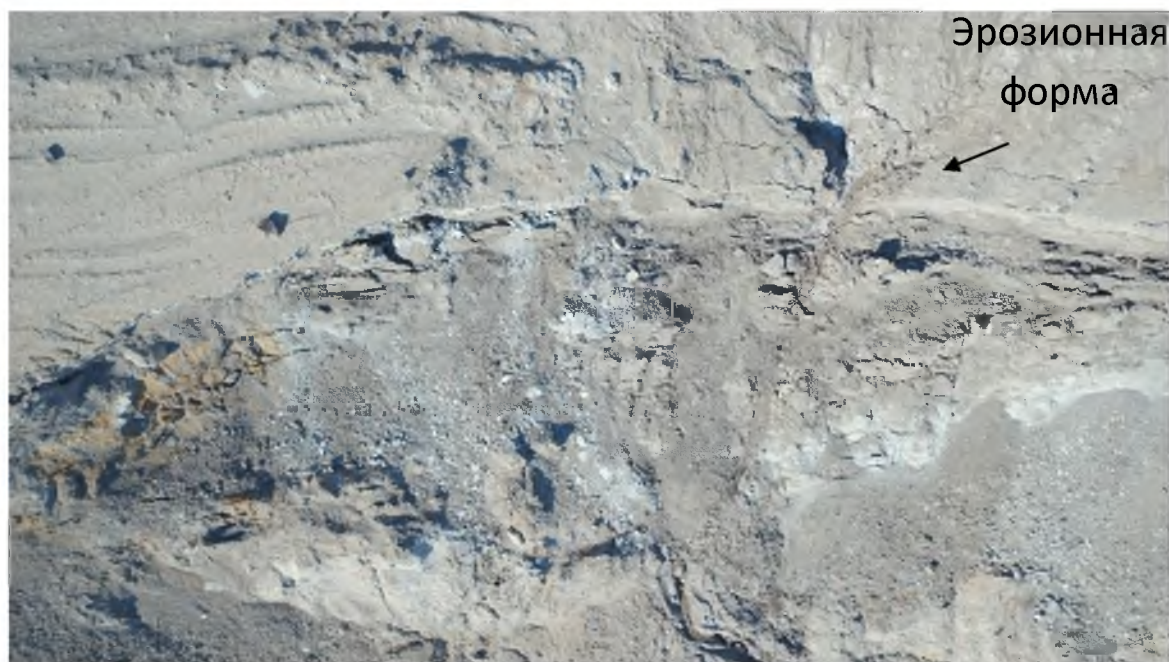


Рисунок 4.17. Оползневой цирк и эрозионная форма (аэрофотоснимок 2018 г.).

Наибольшую опасность для целостности конструктивных элементов борта карьера и безопасной эксплуатации горной выработки представляют оползни блочного типа с глубоким заложением плоскости скольжения и захватом значительных объемов горных пород. Цикл подготовки смещений крупных оползней занимает достаточно длительное время, а само смещение может носить краткосрочный характер и стать катастрофическим событием для предприятия. В отличие от поверхностных оползней, формирование глубоких оползней в верхней части борта карьера вызывает большую озабоченность в связи с возможностью нанесения значительных ущербов, разрушений, вплоть до человеческих жертв.

В 2011 году эксплуатационными службами участка были зафиксированы специфические деформации прибортовой части карьера и первых рабочих горизонтов восточного борта, указывающие на смещение горных пород в сторону карьера на первые сантиметры (по данным Нюрбинского ГОКа).

Для анализа ситуации, понимания природы деформаций восточного борта карьера, идентификации опасного/катастрофического экзогенного геологического процесса, возможного зарождения крупного оползня в пределах борта карьера Нюрбинским ГОКом были проведены масштабные комплексные научно-исследовательские работы. Были привлечены к обследованию восточного борта различные производственные и научно-исследовательские организации – Вилюйская научно-исследовательская мерзлотная

станция, Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр (г. Санкт-Петербург), ФГУП ВИОГЕМ (г. Белгород), «Якутнипроалмаз» (г. Мирный). В результате анализа материалов, полученных Нюрбинским ГОКом и представленных для анализа инженерно-геологической ситуации, было установлено следующее:

1. Отдельные участки горных пород, слагающих восточный борт карьера, имеют высокую электропроводность, и эти области находятся на глубинах ниже 40 м, что считается потенциально опасным с точки зрения устойчивости склона и заложения возможных плоскостей смещения оползневых блоков. Высокоомные аномалии тяготеют к толще алевролитов, в то время как низкоомные аномалии приурочены к контакту карбонатных глин с обломочным материалом и доломитистых известняков.

2. Интерпретация результатов обработки данных георадиолокации указывает на наличие разуплотненных участков грунтов вблизи восточного борта карьера. Высказано предположение, что эти низкоомные аномалии могут быть связаны с процессами медленно развивающегося разуплотнения горных пород с сопутствующим влагонасыщением пустот пористого пространства.

3. Мерзлотная обстановка на участке исследований по результатам скважинного термоконтроля оценивается как удовлетворительная. Достаточно небольшого растепления для активации оползневого процесса. Температуры грунтов составляют примерно $-1,5$ °С, верхняя часть разреза имеет -1 °С.

4. Для бортовых участков карьера (С-3, С-В, Ю-3, Ю-В) был выполнен расчет коэффициента запаса устойчивости по наиболее напряженным поверхностям скольжения. Все коэффициенты демонстрируют показатели выше нормативного значения ($n=1,3$). Одна из поверхностей скольжения потенциально может быть расположена на юго-восточном борту, и ее граница выходит на поверхность на горизонте +230 м, коэффициент запаса устойчивости по этой поверхности равен 2,02, что более нормативного ($n=1,3$). Граница зоны сдвиговых деформаций (т.е. область отрыва) может потенциально проходить в 175 м от верхней бровки карьера.

5. Полученные показатели физико-механических свойств грунтов по двум скважинам – ИГС 3 и ИГС 4, а именно большие отличия свойств и их физическая согласованность (данные 1999 и 2009 года), говорят о снижении прочностных показателей (сцепления и прочности при сжатии и растяжении), увеличении пористости и влажности.

6. В пределах юго-восточного борта карьера зафиксирован ряд локальных нарушений устойчивости временно нерабочих уступов на горизонтах 205–220 м, 190–205 м и 160–190 м. Данный характер нарушений устойчивости классифицируется как оползни,

это обуславливается наличием в борту карьера локальных водопроявлений и обводнением уступов в призме их сдвижения на всех вышеперечисленных горизонтах.

7. Произошло увеличение скорости смещения реперов. Значение вектора скорости смещения V_{tz} реперов дневной поверхности растет при приближении к бровке карьера. Произошло сезонное увеличение скорости по сравнению с предыдущим циклом. Общая тенденция распределения векторов скоростей смещения имеет признаки вероятной поверхности смещения массива перекрывающих пород с выходом в борт карьера на горизонте +220.

За один цикл измерений (осень 2014 г. – весна 2015 г.) по данным «Генезиса» смещения достигли: в северо-восточной части карьера – 41 мм (СКВ 2), в центральной части восточного борта карьера – 55 мм (ЮВ – 5). Подобные изменения в массиве горных пород находят свое отражение в активном проявлении экзогенных геологических процессов в пределах конструктивных элементов борта карьера.

Кроме того, в июне 2014 г. и в феврале–июне 2015 г. вышли из строя две наблюдательные гидрогеологические скважины – СГ-5 и СГ-9 – на север-северо-западном борту карьера “Нюрбинский”. В обоих случаях зафиксирована деформация колонн скважин в интервалах глубин 55–70 м. Деформации скважин по времени совпали с увеличением смещений по линии реперных наблюдательных станций, установленных на северо-западном борту карьера “Нюрбинский”. Для анализа причин, приведших к выходу из строя наблюдательных скважин, в июле 2015 г. были заданы скважины ИГС-28 и ИГС-29 с проектными глубинами по 100 м каждая (рис. 4.18). Первая из них пройдена между аварийными скважинами, вторая – в 300 м к западу.



Рисунок 4.18. Местоположение Диагонального разлома в север-северо-западном борту карьера и инженерно-геологических скважин (черные треугольники), пройденных в июле 2015 г. (по данным Нюрбинского ГОКа).

Полученные в результате бурения данные свидетельствуют, что интервал, в пределах которого были зафиксированы деформации скважин, соответствует развитию средненижнеюрских пород укугутской свиты: аргиллитам, песчаникам и алевролитам. В обеих скважинах породы в указанном интервале мерзлые с прожилками льда, развитыми как по плитчатости, так и по трещинам других направлений. В документации отмечается присутствие зеркал скольжения по трещинам. Визуально в пределах аргиллитовой пачки в скважине ИГС-28 отмечается большая, по сравнению с другими породами, нарушенность зерна трещинами и наличие участков рассланцевания пород с многочисленными зеркалами скольжения. На глубинах 91–92 м в скважине ИГС-28 отмечена вода, что указывает на возможное наличие горизонтов растепленных пород. Наличие интервала с повышенной трещиноватостью и приуроченность к нему зеркал скольжения в скважине ИГС-28 свидетельствуют о том, что деформации могли происходить на глубинах 55–70 м. Скважины СГ-5 и СГ-9 были расположены непосредственно в зоне влияния Диагонального разлома, который может служить областью разгрузки напряжений в массиве, каналом для миграции поверхностных и подземных вод как по вертикали, так и по горизонтали.

В результате изучения и обобщения накопленных материалов, натурного обследования восточного борта карьера «Нюрбинский» установлено, что на участке сложилась сложная инженерно-геологическая обстановка. По материалам исследований выявлена тенденция к изменению физико-механических свойств грунтов в разрезе. В наблюдательных скважинах в интервале глубин 55–70 м произошло смещение обсадных колон и выход из строя наблюдательных скважин. По наблюдательным реперам инструментально зафиксированы смещения борта в сторону карьера. В результате обследования вынесены места форм проявления деформаций на дневной поверхности, которые могут фиксировать пластические деформации в массиве горных пород – трещины, просадки поверхности, заколы. По восточному борту выделены две области: область, в которой отмечены многочисленные проявления деформаций; область с единичными проявлениями деформаций на дневной поверхности (рис. 4.19). Исходя из планового положения форм проявления деформаций конструктивных элементов борта карьера, сделано предположение о возможном зарождении крупного оползневого тела в юго-восточном сегменте. Предполагаемая область смещения расположена на глубине 40–50 м, где возможны пластические деформации горных пород, возможно наличие талых зон. Наличие деформаций в массиве горных пород имеет отражение в динамике смещения реперов, проявлении трещин, просадок и обвалов на конструктивных элементах борта карьера. В оползневые смещения могут быть вовлечены горные породы объемом свыше 1 млн м³. Восточный борт при сложившихся инженерно-геологических условиях имеет потенциал к проявлению и нарастанию медленных пластических деформаций, смещению крупных блоков в сторону карьера. Текущие инженерно-геологические условия восточного борта карьера нуждаются в изучении, детализации факторов, инженерно-геологическом контроле состояния, наблюдении за температурой горных пород, динамикой общей экзогеодинамической ситуации, выявлении степени опасности экзогенных геологических процессов, в частности развития крупных оползней.

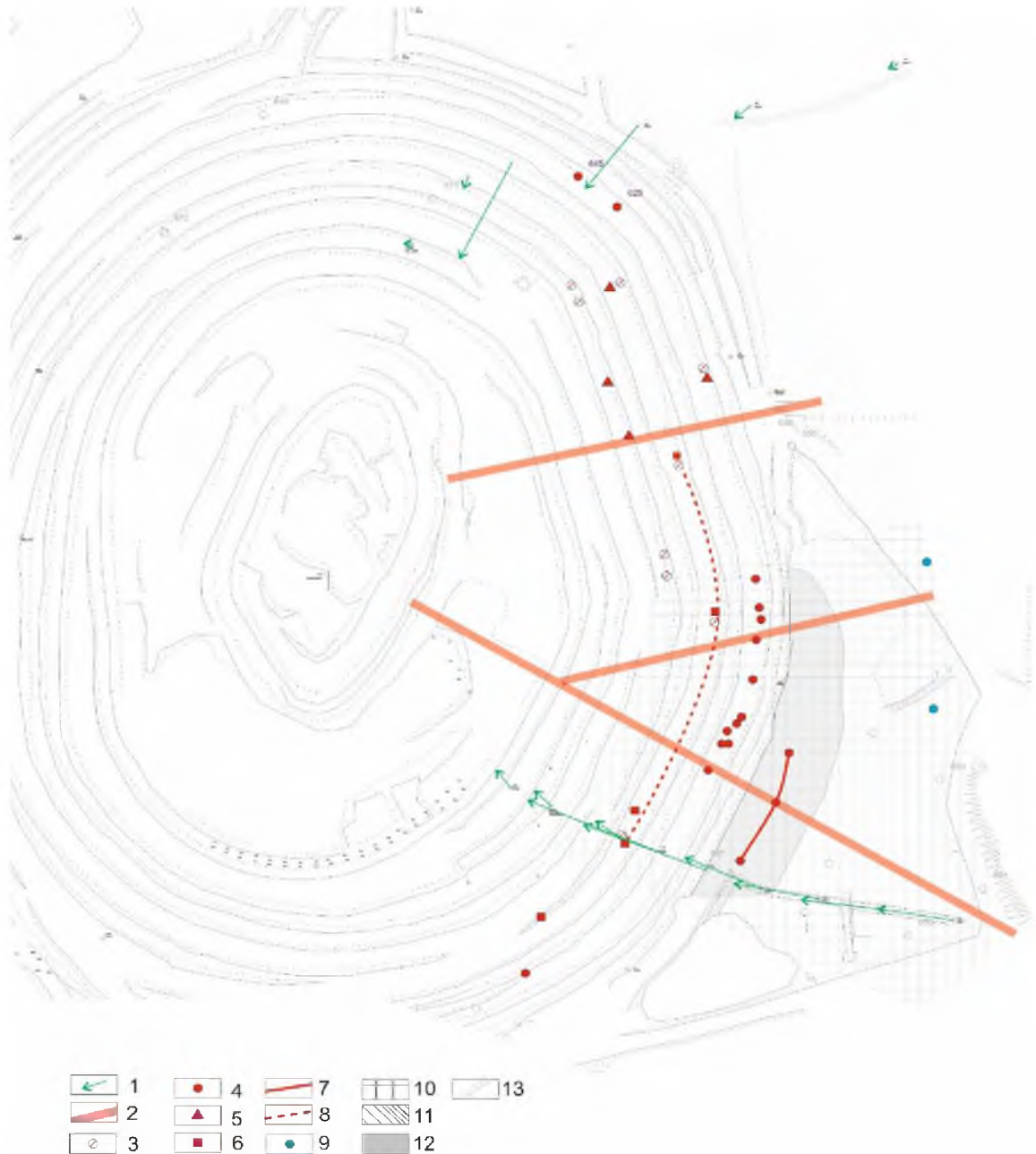


Рисунок 4.19. Области деформаций конструктивных элементов восточного борта карьера (составлено с использованием данных Нюрбинского ГОКа и результатов выполненных обследований на период 2014 г).

1 – направление вектора и динамика смещений по реперам; 2 – зона тектонического разлома; 3 – трещины в откосе уступа; 4 – трещина на поверхности бермы; 5 – осыпи; 6 – обвалы; 7 – основная ось просадки; 8 – участок борта карьера с интенсивно трещиноватыми горными породами, обвально-осыпными явлениями; 9 – выходы подземных вод; 10 – область максимальных деформаций конструктивных элементов борта карьера; 11 – область единичных проявлений деформаций конструктивных элементов борта карьера; 12 – площадь предполагаемого оползня; 13 – конструктивные элементы борта карьера.

4.3. Температурное состояние грунтов (результаты геокриологического мониторинга)

Температурный мониторинг горного массива бортов карьера «Нюрбинский» осуществлялся по четырем наблюдательным скважинам: ИГС-20, ИГС-21, ИГС-28 и ИГС-30. Местоположение термометрических скважин на площадке карьера «Нюрбинский» представлено на рисунке (рис. 4.20).

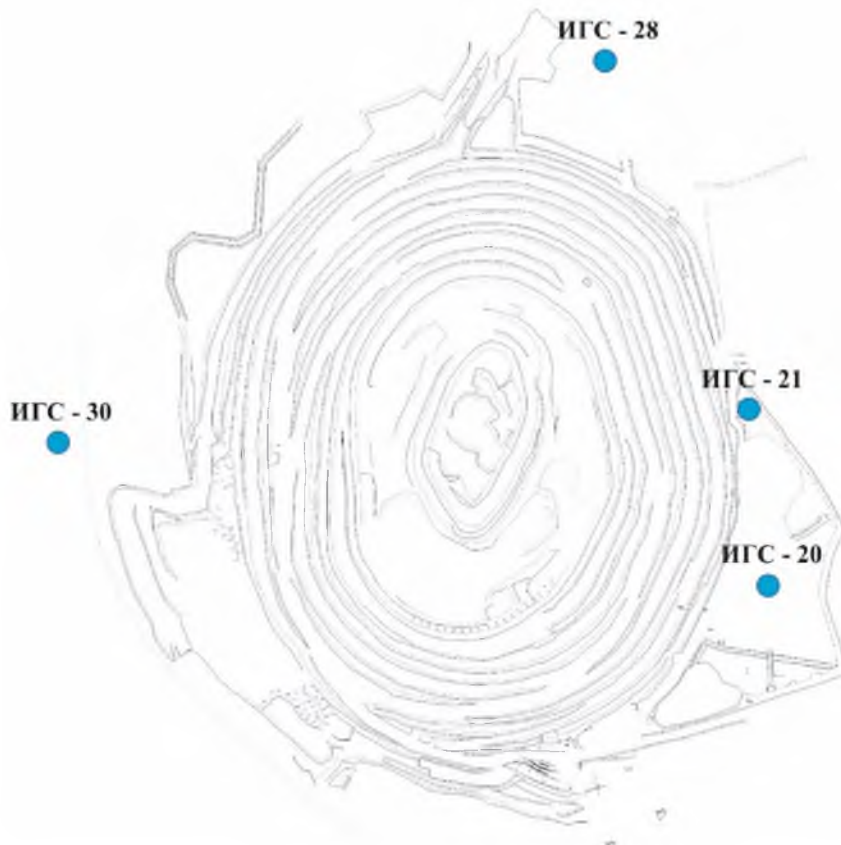


Рисунок 4.20. Схема расположения мониторинговой сети термометрических скважин трубки Нюрбинской.

Местоположение скважин было обосновано локальными структурно-тектоническими особенностями строения горного массива, выявленных деформаций восточного борта карьера «Нюрбинский». Непрерывные измерения температуры грунтов проводились по скважинам ИГС-20 и ИГС-21 с мая 2014 г. на глубину 35 м. В октябре 2015 г. дополнительно было установлено оборудование для мониторинга температуры в северной части карьера в скважине ИГС-28, на месте вышедших из строя гидрогеологических скважин в зоне Диагонального разлома. Глубина измерения температуры горных пород по скважине ИГС-28 составляет 90 м. Для выявления фонового режима температуры горных пород в ненарушенных условиях выбран участок,

находящийся в зоне минимального техногенного воздействия, в естественном ландшафте. Скважина ИГС-30 расположена в лесном массиве, удалена от карьера и отвалов, глубина измерений составила 35 м.

За период наблюдений получены непрерывные ряды температурного состояния горных пород на площадке месторождения. По скважинам ИГС-20 и ИГС-21 ряд температурных наблюдений составляет около 30 тысяч измерений по каждому из датчиков и по скважине ИГС-28 всего 17 258 измерений по каждому из датчиков (погрешность прибора по паспорту $\pm 0,1$ °С).

На температурное состояние верхней части горного массива значительное влияние оказывают общие изменения температуры атмосферного воздуха в районе исследований. Верхние слои (до 2 м) достаточно чутко реагируют на изменения температуры воздуха и имеют максимальную амплитуду колебания температуры. С глубиной колебания температуры горного массива закономерно затухают. В скважинах ниже 4 м сохраняется устойчивая отрицательная температура с максимальным значением от $-0,28$ °С (ИГС-20) до $-0,23$ °С (ИГС-21), показатели температуры с глубиной плавно понижаются (табл. 4.1)

Таблица 4.1

Данные изменений температуры в скважине ИГС-20
за период наблюдений (18.05.2014 г. – 18.09.2017 г.)

№ датчика	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Глубина, м	1	2	4	7	10	13	16	20	25	30	35
Мин. Т, °С	-9,95	-2,9	-0,34	-0,76	-0,91	-1,04	-1,31	-1,28	-1,33	-1,5	-1,59
Макс. Т, °С	13,59	4,44	-0,28	-0,63	-0,78	-0,91	-1,18	-1,22	-1,27	-1,38	-1,53
Средн. Т, °С	-0,14	0,08	-0,29	-0,68	-0,83	-0,98	-1,25	-1,28	-1,27	-1,44	-1,57

Детальный анализ температуры горных пород в скважинах ИГС-20 и ИГС-21 показал некоторые отличия температур в скважинах и что более низкие значения температур горных пород за три года наблюдений отмечены в скважине ИГС-21, она в целом более холодная, чем ИГС-20 (рис. 4.21). В то же время, с глубины 16 м температуры горных пород выравниваются, достигая $-1,3$ в ИГС-20 и $-1,5$ °С в ИГС-21, что расхождения сопоставимы с погрешностью прибора измерений (погрешность логера $\pm 0,1$ °С).

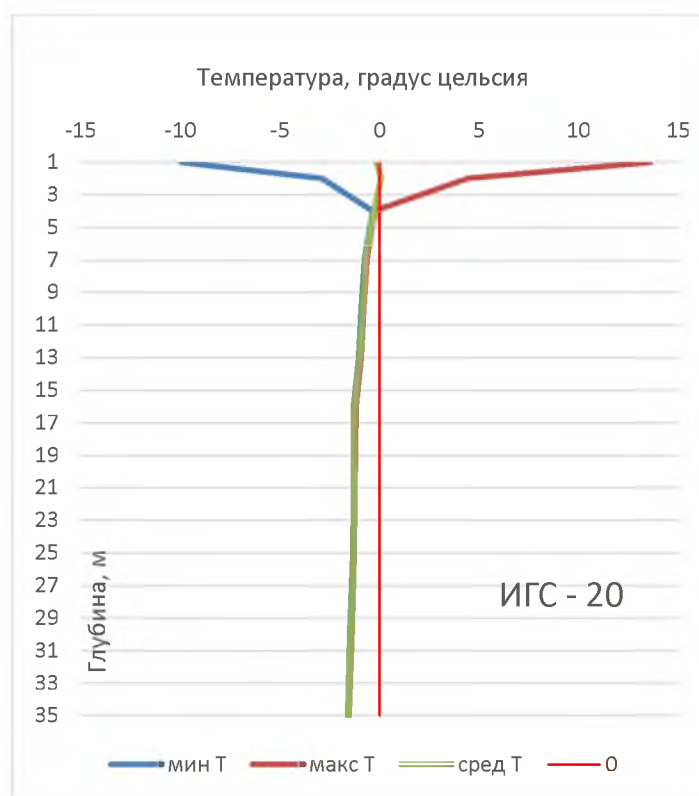


Рисунок 4.21. Показатели температуры горных пород в скважине ИГС-20.

Скважина ИГС-21 расположена в 70 м от бровки карьера. Значения более низких температур в интервале глубин 4–7 м в сравнении с ИГС-20, вероятнее всего, связаны с дополнительным проникновением холодного фронта со стороны карьера (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Данные изменений температуры в скважине ИГС-21
за период наблюдений (18.05.2014 г. – 18.09.2017 г.)

№ датчика	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Глуб., м	1	2	4	7	10	13	16	20	25	30	35
Мин. Т, °С	-14,99	-9,56	-5,03	-2,35	-1,77	-1,59	-1,57	-1,71	-1,8	-1,86	-2,13
Макс. Т, °С	15,89	9,12	-0,23	-0,95	-1,14	-1,14	-1,18	-1,27	-1,49	-1,61	-1,81
Средн. Т, °С	-0,18	-0,42	-1,53	-1,53	-1,46	-1,42	-1,41	-1,53	-1,64	-1,72	-1,92

Термометрические особенности скважины ИГС-21 в целом предопределены ее пространственным положением на площадке месторождения, близкое положение к бровке карьера. Каждый сезон в скважине ИГС-21 на глубине 4 м зафиксируются скачки повышения температуры горных пород. Периоды повышения температуры в скважине соответствуют апрелю месяцу в 2015, 2016 и 2017 годах (рис. 4.21). Экспозиция склона,

где расположена скважина, такова, что при инсоляции весной происходит значительный прогрев горного массива в течение светового дня и проникновение теплового фронта со стороны карьера в массив, что и приводит ежегодно к повышению температуры в пределах отмеченного слоя.

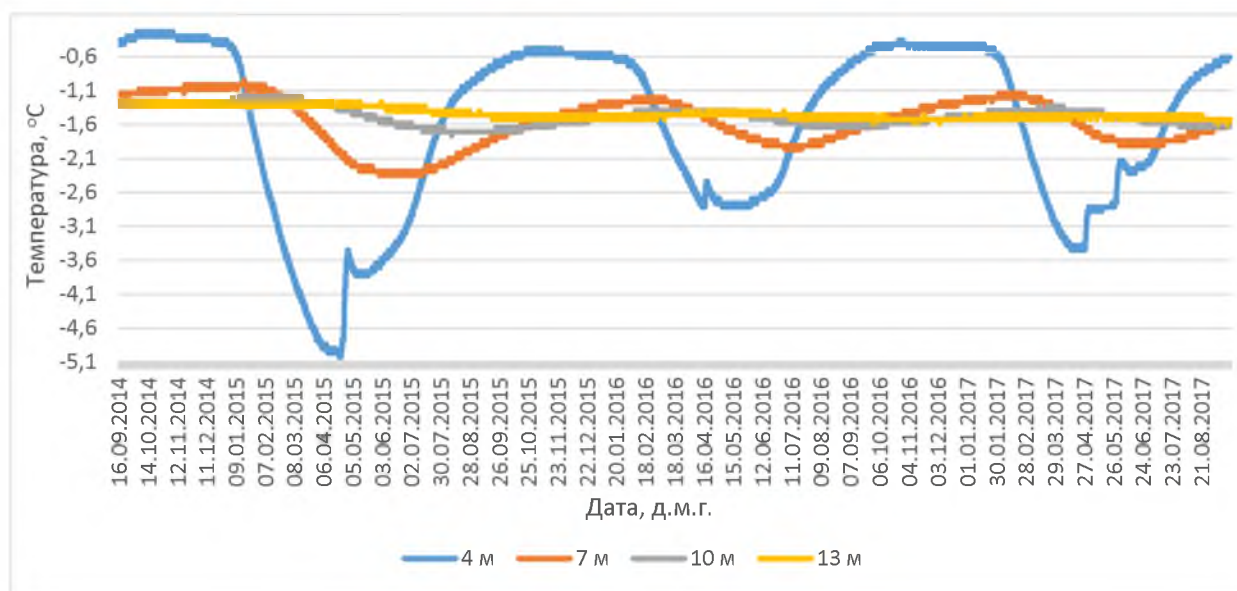


Рисунок 4.21. График температуры скважины ИГС-21 за весь период наблюдений (в интервале 4 – 10 м). Отмечены пики резкого повышения температуры.

Для более точного и обоснованного определения влияния внешних факторов на температурный режим горного массива, влияния инсоляции или других внешних факторов, требуются более длительные временные ряды натуральных наблюдений.

В результате анализа данных по температурному режиму горных пород в районе карьера «Нюрбинский» (2014–2017 гг.) установлено, что мощность сезонного слоя промерзания–протаивания на площадке с техногенной отсыпкой достигает глубины более 2 м, многолетние колебания отрицательных температур проникают на глубину 3–4 м. Ниже отметки 4 м горные породы мерзлые, температура находится в диапазоне от -2 до -1 °C.

В фоновой скважине ИГС-30 температура многолетнемерзлых грунтов ниже деятельного слоя также находится в диапазоне отрицательных температур, от $-2,18$ до $-1,67$ °C (табл. 4.3).

Проникновение положительного фронта температуры зафиксировано только на глубину 1 и 2 м, ниже этой отметки положительных значений температуры не отмечено. С глубины 4 м и ниже фиксируется стабильная отрицательная температура в диапазоне от $-0,54$ °C на глубине 4 м до $-2,24$ °C на глубине 13 м. Ниже 13 м температура плавно повышается до $-1,8$ °C. Сравнение температур горных пород в фоновой скважине (ИГС-

30) с температурами в скважинах на техногенно преобразованной площадке (ИГС-20 и ИГС-21) показали, что в диапазоне от 7 до 25 м фиксируются более низкие значения температуры горных пород.

Таблица 4.3

Данные изменений температуры в скважине ИГС-30
за период наблюдений (01.10.2015 г. – 16.06.2016 г.)

Глубина, м	1	2	4	7	10	13	16	20	25	30	35
Мин., °С	-1,98	-0,99	-1,08	-1,78	-2,14	-2,24	-2,16	-2,21	-1,95	-1,9	-1,8
Макс., °С	1,04	0,01	-0,57	-1,53	-1,76	-1,86	-1,78	-1,9	-1,63	-1,58	-1,54
Средн., °С	-0,75	-0,32	-0,90	-1,67	-2,05	-2,18	-2,16	-2,16	-1,94	-1,86	-1,78

В скважине ИГС–28 минимальные температуры грунтов зафиксированы на глубине 90 м – 2,14 °С. В скважине ИГС-28 стояла задача выявить возможное присутствие аномальных зон, поскольку она пробурена в зоне Диагонального разлома на месте вышедших из строя гидрогеологических скважин. В скважине температуры фиксируются с глубины 15 м и глубже (табл. 4.4).

Таблица 4.4

Данные изменений температуры в скважине ИГС – 28
за период наблюдений (16.09.2015 г. – 18.09.2017 г.)

№ датчика	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
гл., м.	15	25	30	40	55	60	65	70	75	85	90
мин. Т, °С	-2,53	-2,35	-2,17	-2,13	-2,03	-2,2	-2,06	-2	-2,05	-2,02	-2,14
макс. Т, °С	-2,21	-2,16	-2,05	-2	-1,91	-1,88	-2	-1,94	-1,98	-1,9	-2,01
сред. Т, °С	-2,35	-2,26	-2,12	-2,06	-1,97	-2,09	-2,04	-1,99	-2,02	-1,96	-2,08

В результате температурного мониторинга в термометрических скважинах на площадке месторождения не выявлены аномальные зоны растепления горной породы.

По глубине расположения датчиков и по данным фактической температуры грунтов в скважинах выполнен анализ колебания температуры за период наблюдений 2014–2017 гг. Установлены стабильно отрицательные температуры массива горных пород в районе месторождения. В верхних частях скважин (ИГС-21 до глубины 4 м и ИГС-20 до глубины 13 м) выделен интервал, где зафиксированы колебания отрицательных температур. Такие

флуктуации в температуре горных пород могут быть связаны с циклами многолетних теплооборотов, влиянием положительного тренда температур воздуха в районе месторождения за период исследований (3 года), а также возможно, с локальными техногенными изменениями ландшафта на участке, что отражается на изменении температур. Горные породы, особенно в верхней части разреза, чутко реагируют на изменение температур воздуха и внешние техногенные изменения. Однако на основании краткосрочных наблюдений говорить о проникновении теплых потоков в массив горных пород и стабильном изменении температуры преждевременно.

В результате исследований температурного режима грунтов карьера Нюрбинский установлено, что грунты сохраняют стабильно отрицательные температуры и остаются в многолетнемерзлом состоянии. Верхняя толща горных пород месторождения до глубины 25 м является высокотемпературными грунтами (до $-2,0$ °C) и при изменении состояния геологической среды, дополнительных техногенных нагрузках способна перейти в талое состояние. При переходе в талое состояние горных пород верхних горизонтов карьера, сложенных мезозойскими отложениями, произойдет ослабление их физико-механических и прочностных свойств, что будет способствовать развитию пластических деформаций в конструктивных элементах верхних горизонтов бортов карьера.

4.4. Экзогеодинамика территории месторождения, инженерно-геологическое районирование бортов карьера

В пределах месторождения с момента начала разработки карьера выполняются масштабные технологические работы, приводящие к формированию техногенного рельефа. Путем заглубления и перемещения больших масс грунта сформированы техногенные отрицательные (карьер) и положительные (отвалы вскрышных горных пород) формы рельефа. В пределах природно-технической системы месторождения сформированы новые инженерно-геологические условия, изменена морфология поверхности и гидрологический режим, нарушены естественные факторы, определяющие температурный режим вмещающих горных пород. В пределах +250-го горизонта карьера естественный рельеф был полностью изменен, произведена вырубка лесного массива и отсыпка крупноглыбовым материалом (рис. 4.23). По восточному борту после выявленных деформаций (просадки, трещины, воронки) приняты и реализованы меры по стабилизации – отсыпка мерзлым крупноглыбовым материалом, организация водоотведения, перехват стока поверхностных вод с отвалов и отведение от карьера. К весне 2014 года на +250-м горизонте восточного борта карьера сформирован техногенный рельеф.



Рисунок 4.23. Панорамный вид восточного борта карьера: *А* – элементы естественного рельефа, осень 2013 г.; *Б* – техногенная отсыпка, весна 2014 г.

В 2014 году начаты регулярные наблюдения за трансформацией природно-технической системы – развитием экзогенных геологических процессов, состоянием конструктивных элементов борта карьера, сложенных мезозойскими отложениями, температурным режимом горных пород.

Обследование конструктивных элементов бортов карьера и анализ распространения экзогенных геологических процессов проводились на протяжении нескольких циклов. Приведем результаты исследования природно-технической системы, отражающие ее состояние в конкретный момент времени и последующую ее трансформацию.

Цикл наблюдений 2015 года (весна – осень). Проведено обследование конструктивных элементов борта карьера. Работы проводились на верхних горизонтах карьера, до уровня границы мезозоя–палеозоя. Закартированы формы проявления экзогенных геологических процессов.

В течение годового периода наблюдений отмечено изменение влажностного режима грунтового массива в разных частях карьера. Весенними работами зафиксировано интенсивное обводнение восточного борта, связанное с нарушением работы водоотводящих канав (рис. 4.24, *А*). К осени отмечено осушение юго-восточной и центральной части восточного борта, поскольку были приняты меры по отведению поверхностных вод от карьера (рис. 4.24, *Б*).

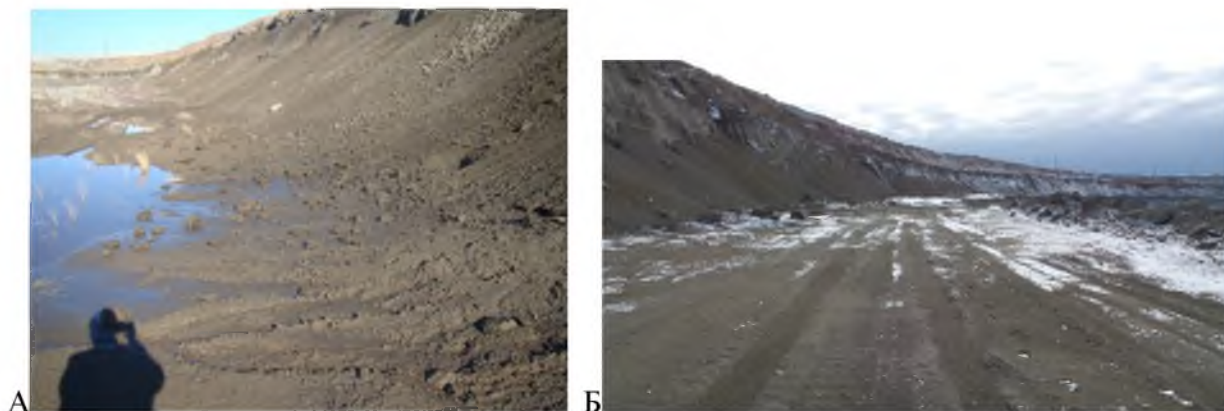


Рисунок 4.24. Сравнение состояния бермы +220-го горизонта центральной части восточного борта карьера: *А* – интенсивно обводнена, июнь 2015 г.; *Б* – осушена, октябрь 2015 г.

При сопоставлении результатов наблюдений весна – лето по ситуационным экзогеодинамическим картам-схемам распространения ЭГП и двух построенных на эти этапы карт-схем плотности форм экзогенных процессов конструктивных элементов борта карьера выявлено, что к осеннему периоду произошло общее снижение проявления деформаций (рис. 4.25). Карты-схемы плотности форм экзогенных процессов демонстрируют развитие экзогенных процессов внутри массива горных пород, поскольку при расчете форм учтены деформации, которые проявляются при развитии глубоких оползней, смещения крупных блоков – трещины, просадки, разрывы, воронки. В пределах оцениваемого +220-го горизонта выделено 16 сегментов (протяженность 150 м). Локализация максимальной плотности форм экзогенных процессов попадает в зоны структурно-тектонической раздробленности. В юго-восточной и центральной части восточного борта карьера отмечена относительная стабилизация активности экзогенных процессов (0-1 формы), вызванная, вероятно, реализацией работ по эффективному водоотведению поверхностных вод от карьера системой нагорных канав на +250-ом горизонте восточного борта карьера.

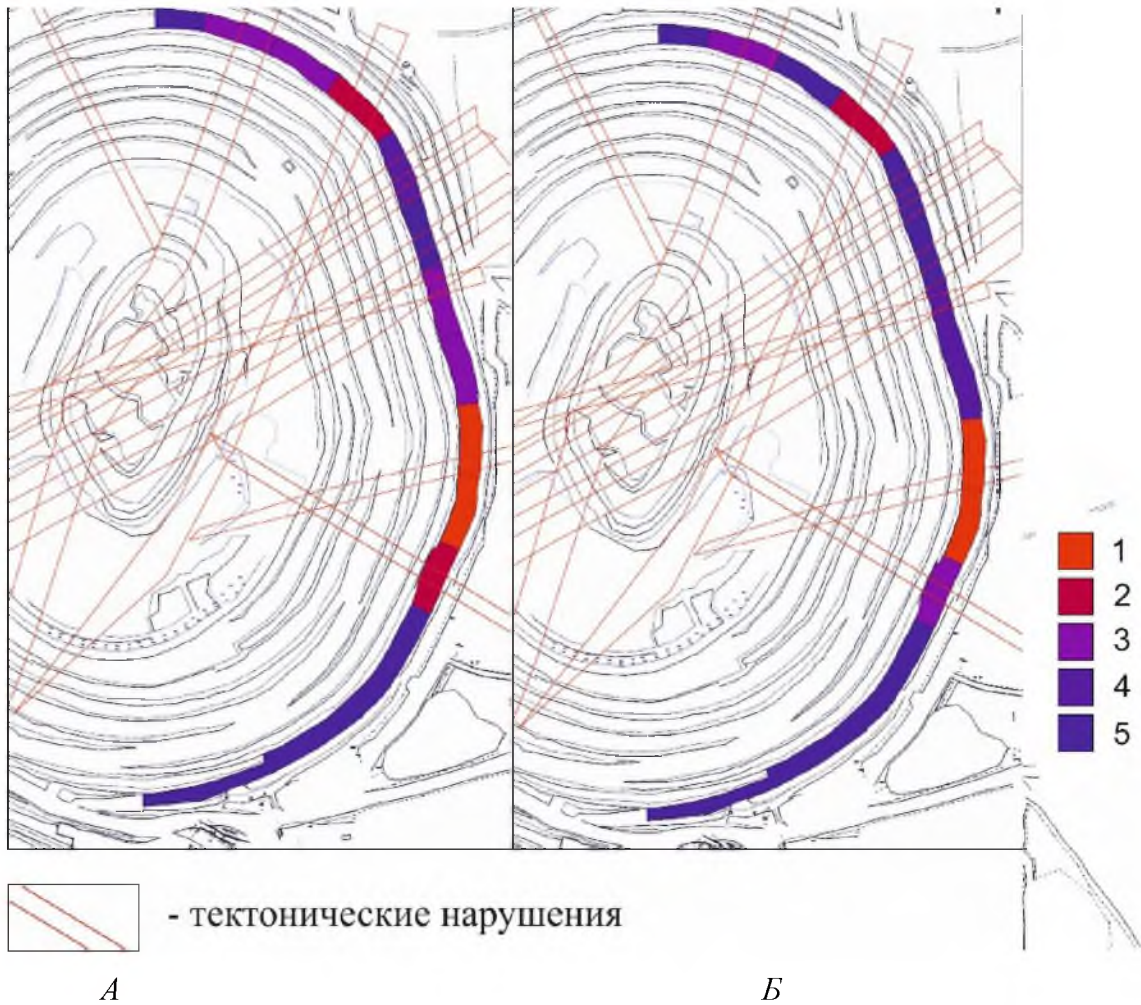


Рисунок 4.25. Сопоставление карт-схем плотности форм экзогенных геологических процессов +200-ого горизонта карьера Нюрбинский по циклам наблюдений 2015 г.: А – июнь; Б – сентябрь. Количество форм на сегмент: 1 – 10–16; 2 – 4–10; 3 – 2–4; 4 – 1–2; 5 – 0–1.

В то же время интенсивные преобразования всего +250-го горизонта привели к изменению гидрологической ситуации в северной части карьера. Северная часть карьера оказалась интенсивно обводнена. Общие преобразования +250-го горизонта привели к задержке стока поверхностных вод к водоотводящей канаве, затрудненному стоку и концентрации воды в северо-восточном сегменте карьера. В результате проникновения поверхностных вод и их интенсивного фильтрационного потока в сторону карьера произошло активное развитие суффозионно-эрозионных явлений на +250-ом горизонте и разгрузка поверхностных вод в карьер (рис. 4.26).

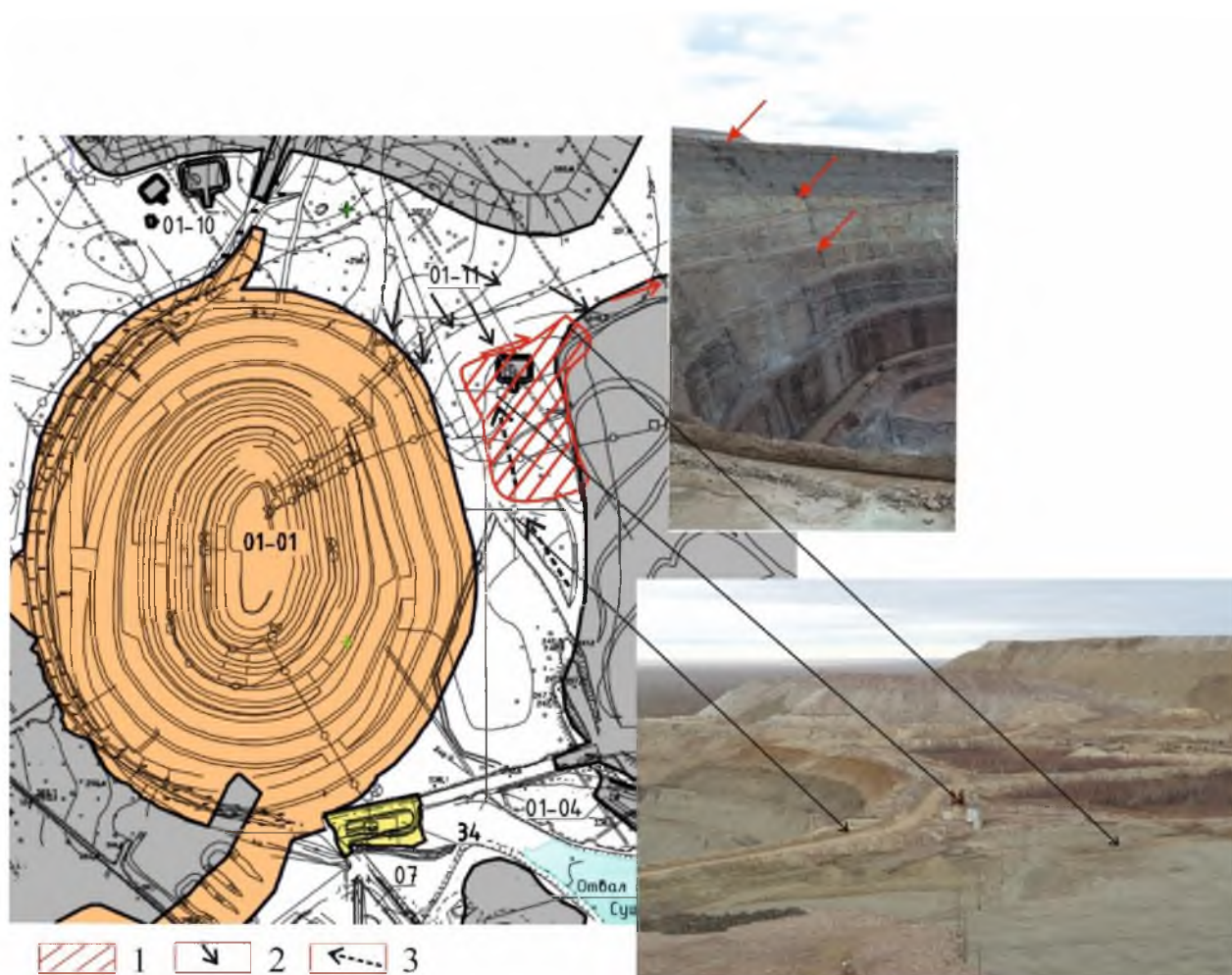


Рисунок 4.26. План-схема трансформации гидрологической ситуации 250-го горизонта северного и восточного бортов карьера к осени 2015 г.

1 – отсыпка территории; 2 – направление движения водного потока с элементами естественного характера; 3 – направление движения воды по нагорной канаве.

Цикл наблюдений 2016 года (весна – осень). В результате выполненных работ построены ситуационные экзогеодинамические карты-схемы распространения экзогенных геологических процессов в карьере и карты-схемы плотности форм экзогенных геологических процессов восточного борта карьера по состоянию на июнь и сентябрь 2016 года.

В результате визуального обследования конструктивных элементов борта карьера отмечено, что наиболее типичные формы проявления экзогенных геологических процессов характерны для определенных горизонтов борта карьера «Нюрбинский». Развитие экзогенных геологических процессов приводит к нарушению целостности конструктивных элементов борта карьера в перекрывающих отложениях (рис. 4.27).

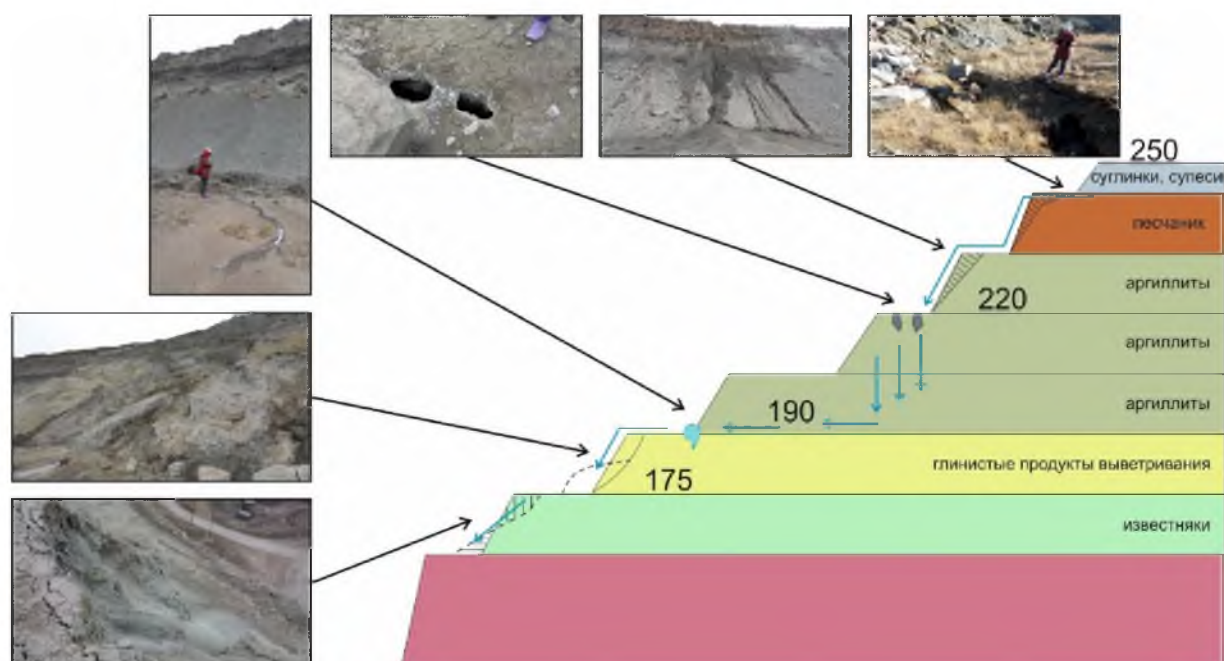


Рисунок 4.27. Схема деформаций уступов борта карьера с учетом литологии слагающих пород.

Верхнюю часть разреза борта карьера слагают сильнольдистые четвертичные илистые суглинки и супеси, слабоустойчивые к процессам выветривания. При нарушении дернового слоя супеси и суглинки легко размываются. Преобладают процессы эрозии и суффозии. На поверхности проявляются суффозионные провалы и просадки, овраги и эрозионные врезы.

Ниже борт карьера вскрывает юрские песчаники, которые в процессе выветривания (дезинтеграции) и высушивании уступов и берм карьера образуют песчаные частицы, перевеваемые ветром, – эоловый перенос. Отмечены следы накопления песчаных отложений с формированием маломощных эоловых полей.

В интервале глубин 40–50 м (+220-й горизонт и ниже) залегает пачка аргиллитов, отложения которой характеризуются повышенной трещиноватостью. Породы имеют тонкослоистую текстуру и при выветривании расланцовываются, проявляя склонность к формированию вывалов, осыпей, обвалов. На +220 и +190-м горизонтах отмечаются нависающие карнизы, вывалы, обвалы, осыпи. На бермах этих горизонтов отмечаются трещины, провалы, заколы, воронки. При увлажнении склона проявляются зияющие трещины, провалы.

Ниже по разрезу залегают глинисто-щебенистые отложения продуктов выветривания терригенно-карбонатных пород триаса. При переувлажнении формируются пластичные деформации – осыпи, оползни-потоки, оползни. Подобные деформации бровки бермы характерны для +175-го горизонта. А залегающие ниже древние коры

выветривания (известняки) дезинтегрированы и интенсивно разрушаются до пылеватого состояния, проявляя просадки, смещения масс грунта на склоне.

При анализе карт-схем плотности форм экзогенных процессов выявлено, что к сентябрю 2016 года произошло повышение плотности форм деформаций массива горных пород в восточной части борта карьера, в частности +175-го горизонта (рис. 4.28). В пределах +220 и +175 горизонтах выделено по 10 сегментов.

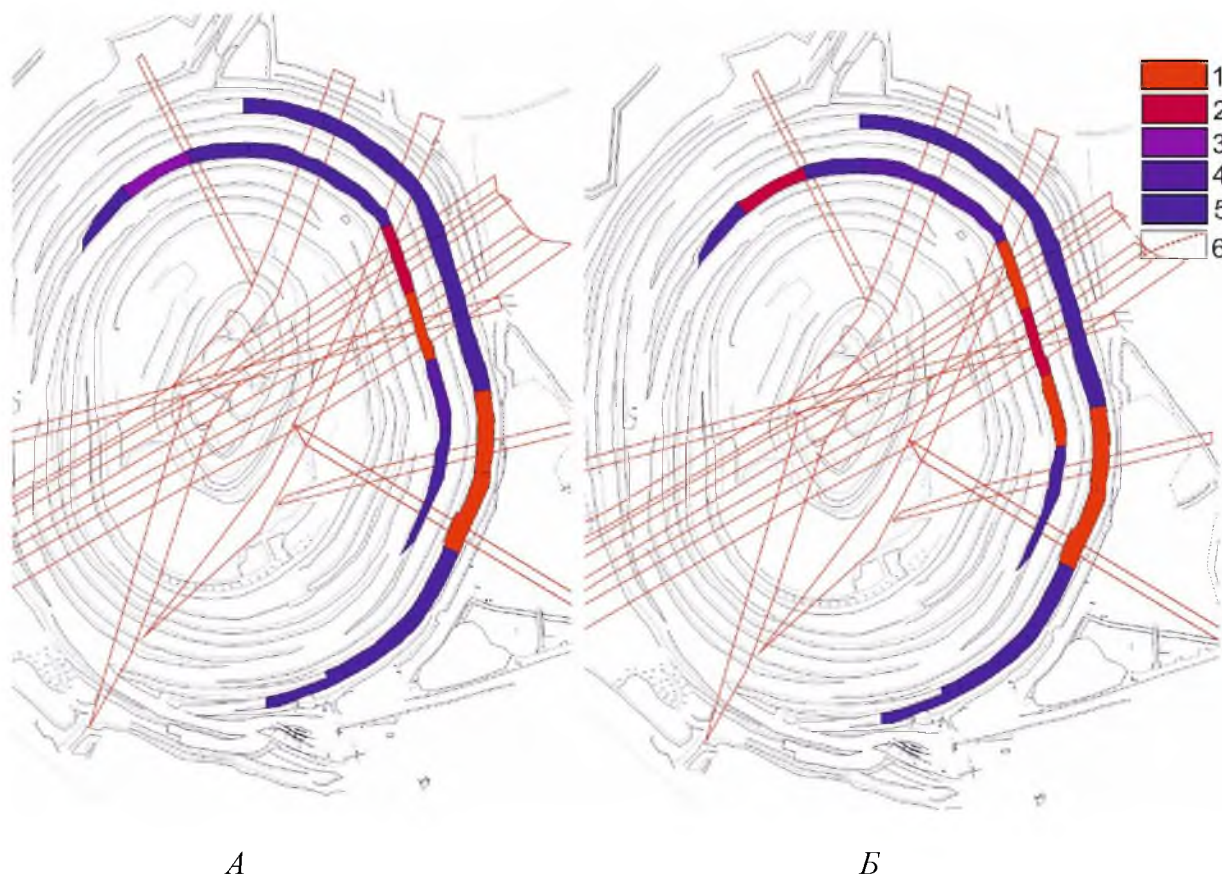


Рисунок 4.28. Сопоставление карт-схем плотности форм экзогенных геологических процессов +220, +175-ого горизонтов карьера Нюрбинский по циклам наблюдений 2016 г.: А – июнь; Б – сентябрь. *Количество форм на сегмент: 1 – 12–20; 2 – 8–12; 3 – 4–8; 4 – 1–4; 5 – 0–1; 6 – разломные зоны.*

В зоне структурно-тектонических неоднородностей плотность форм ЭГП увеличилась и проявилась ярче на +175-м горизонте. Произошло увеличение форм в одном сегменте с 1–4 форм до 12–20 форм. +220-й горизонт сохранил идентичное состояние с весны до осени. Сохранилась высокая активность процессов и плотность деформаций юго-восточного сектора борта карьера. Такие пространственно-временные закономерности развития экзогенных процессов на фоне структурно-тектонического рисунка участка связаны с накоплением деформаций берм карьера за теплый период и с

дополнительным увлажнением поверхностными водами (отмечено увлажнение восточного борта карьера).

Наблюдения 2017 года. Обследованы бермы и уступы +220 и +190-го горизонтов, поверхность +250-го горизонта (северный, восточный, юго-восточный и западный борта карьера).

На территории поверхности +250-го горизонта в северной части карьера произведена отсыпка дороги вдоль бровки карьера, частично сохранен естественный рельеф поверхности. В локальном понижении между северным отвалом и дорогой сформирован водоем с открытой стоячей водой, угнетенной тундровой растительностью (рис. 4.29).



Рисунок 4.29. Техногенный водоем на поверхности северного сегмента участка карьера.

Поверхность +250-го горизонта интенсивно преобразована, и в большей мере превалирует техногенный рельеф. Отсыпка поверхности выполнена глыбово-щебенистым материалом. Видимых и значительных деформаций +250-го горизонта восточного борта карьера на момент обследования не зафиксировано. Отмечены отдельные просадки, небольшие трещины; вероятнее всего, это следы локальных переуплотнений грунтов основания техногенной отсыпки. На поверхности восточного борта карьера организован перехват и водоотведение поверхностных вод. Функционирует водоотводящая канава и зумпф – аккумулирующая емкость для воды. Поступление воды (подток) в канаву происходит с бортов канавы и в большей мере с северной стороны карьера.

В западном сегменте карьера ведутся технологические работы по расширению контура карьера. Бермы, откосы верхних горизонтов на момент обследования еще не сформированы и находятся в процессе работ.

При визуальном обследовании горизонтов +175 и +160 установлено, что бермы и откосы этих горизонтов интенсивно преобразованы процессами выветривания. По периметру карьера во многих частях, особенно в восточной части карьера, горизонты смыкаются единым шлейфом осыпей, вызванных выветриванием горных пород. В северной части карьера 175-го горизонта превалирует формирование оползневых цирков, за счет переизбыточного увлажнения и особенностей литологического состава древних кор выветривания в разрезе (рис. 4.30).

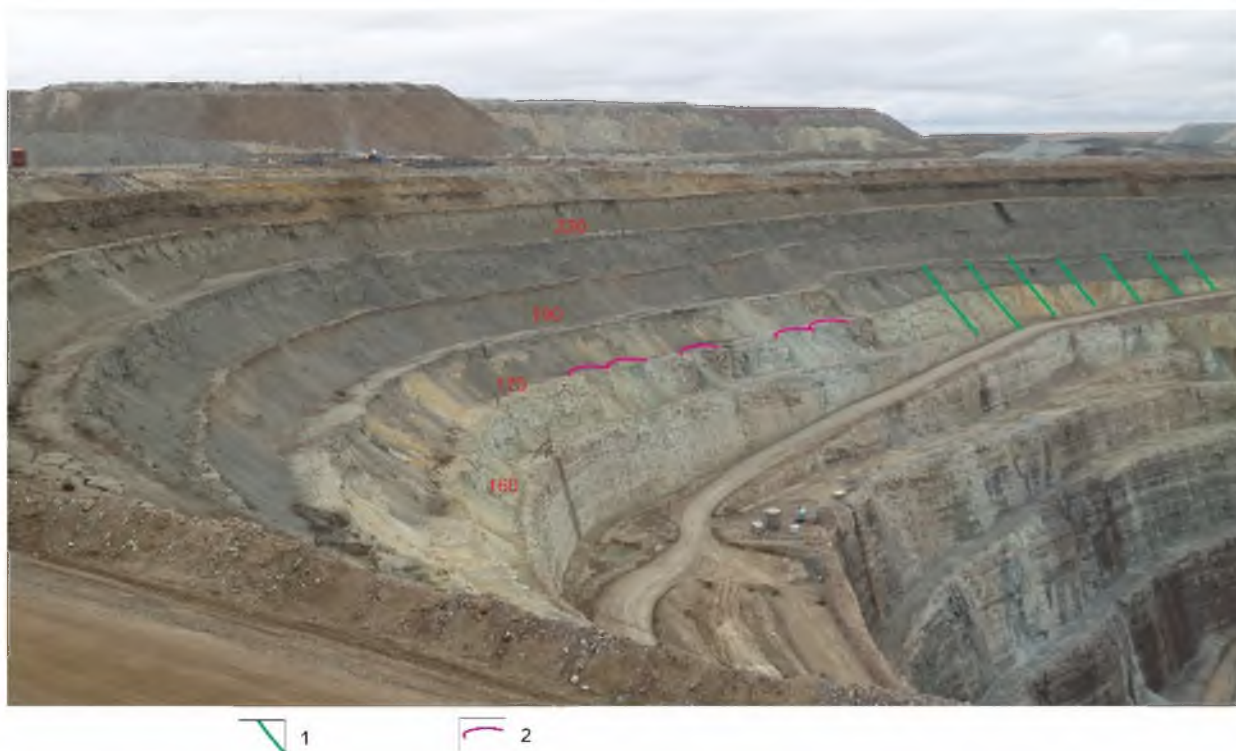


Рисунок 4.30. Общий вид северного и восточного борта карьера.
Области проявления: 1 – осыпей; 2 – оползней.

Деформации берм карьера проявляются в виде локальных трещин, провалов, просадочных форм, отдельных вывалов, эрозионных и эрозионно-суффозионных форм, площадного развития осыпей. Проявление деформаций в виде трещин, провалов и просадок имеет унаследованный характер, некоторые формы замьты и заполнены привнесенным рыхлым материалом, контуры этих форм снивелированы.

В результате проникновения воды в карьер формируется переувлажнение склона, вплоть до видимой разгрузки воды из средней части откосов на +220 и +190-м горизонтах (рис. 4.31).



Рисунок 4.31. Эрозионные формы в местах разгрузки подземных вод на +190-м горизонте.

В 2017 году на поверхности +250-го горизонта в северном секторе карьера имеется искусственный водоем. Близкое положение водного объекта к зоне структурно-тектонической неоднородности массива горных пород может негативно отражаться на гидравлической связи поверхностных вод и разгрузки воды по борту карьера – на +220 и +190-м горизонтах. В северной части отмечены участки интенсивного увлажнения конструктивных элементов борта карьера с развитием эрозионных и суффозионных процессов. В юго-восточной части карьера также выявлено увлажнение склона. Разгрузка воды на +220 и +190-м горизонтах происходит на бермах из-под шлейфа осыпей. Такое распределение воды по склону борта может свидетельствовать об инфильтрации поверхностных вод в борт карьера с поверхности +250-го горизонта (рис. 4.32). Ситуационная экзогеодинамическая карта-схема отражает распространение всех зафиксированных на момент обследования экзогенных геологических процессов на бортах карьера, их территориальное положение и области интенсивного увлажнения борта карьера.

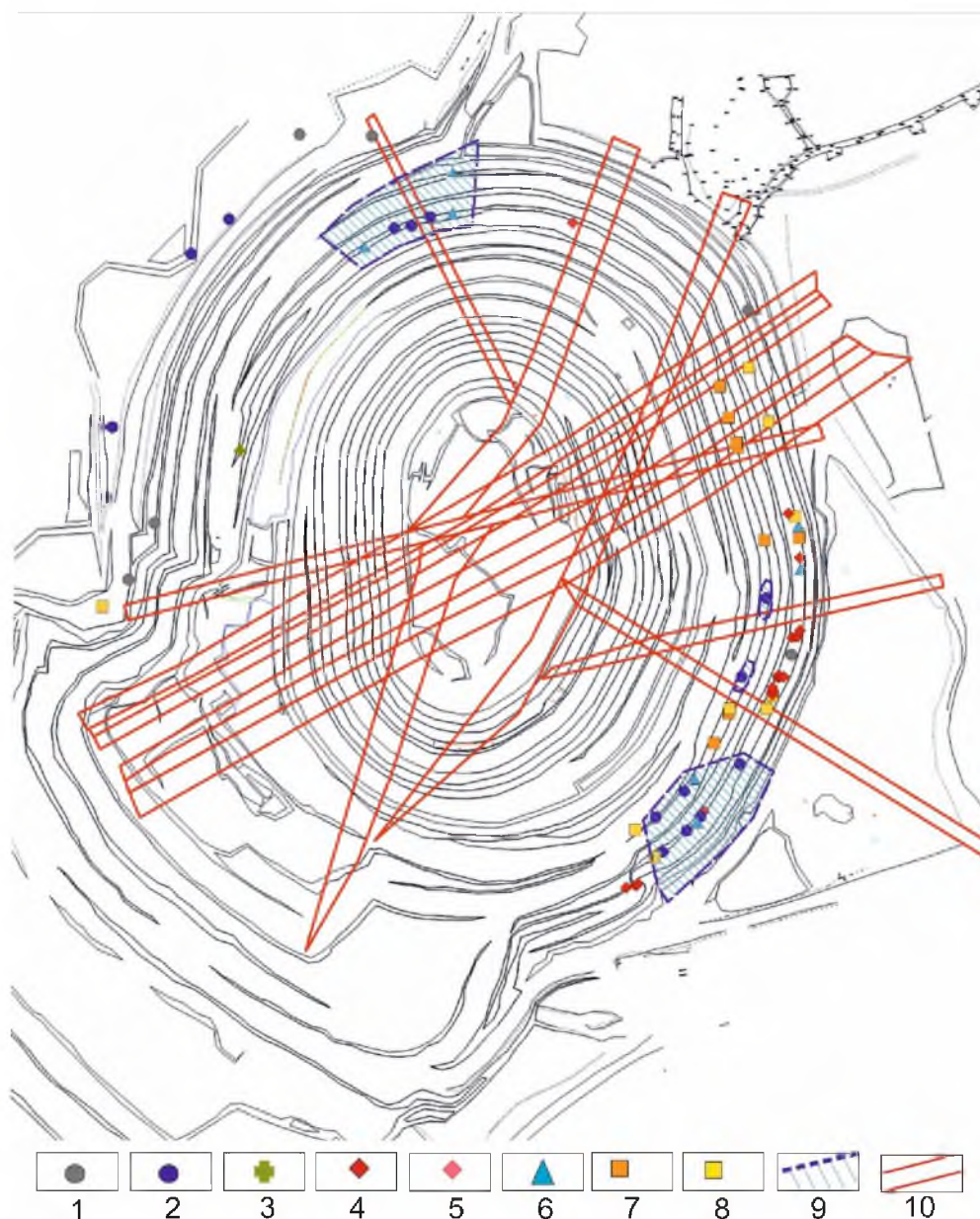


Рисунок 4.32. Ситуационная экзогеодинамическая карта-схема распространения экзогенных геологических процессов на бортах карьера «Нюрбинский» (осень 2017 г.).

1 – точка наблюдений; 2 – выход подземных вод; 3 – оползень; 4 – просадка; 5 – трещина; 6 – эрозия; 7 – обвал; 8 – осыпь; 9 – область увлажнения; 10 – разлом.

Для понимания картины деформаций внутри массива горных пород построены карты-схемы плотности форм экзогенных геологических процессов +200-го горизонта. Наибольшая плотность проявления форм экзогенных геологических процессов характерна для юго-восточного борта. Максимальная плотность деформаций от развития экзогенных процессов тяготеет к зоне структурной неоднородности массива горных пород и зонам избыточного увлажнения. Карта-схема плотности форм экзогенных геологических процессов демонстрирует состояние +220-го горизонта карьера на сентябрь 2017 года (рис. 4.33). Выделено 12 сегментов по 150 м.

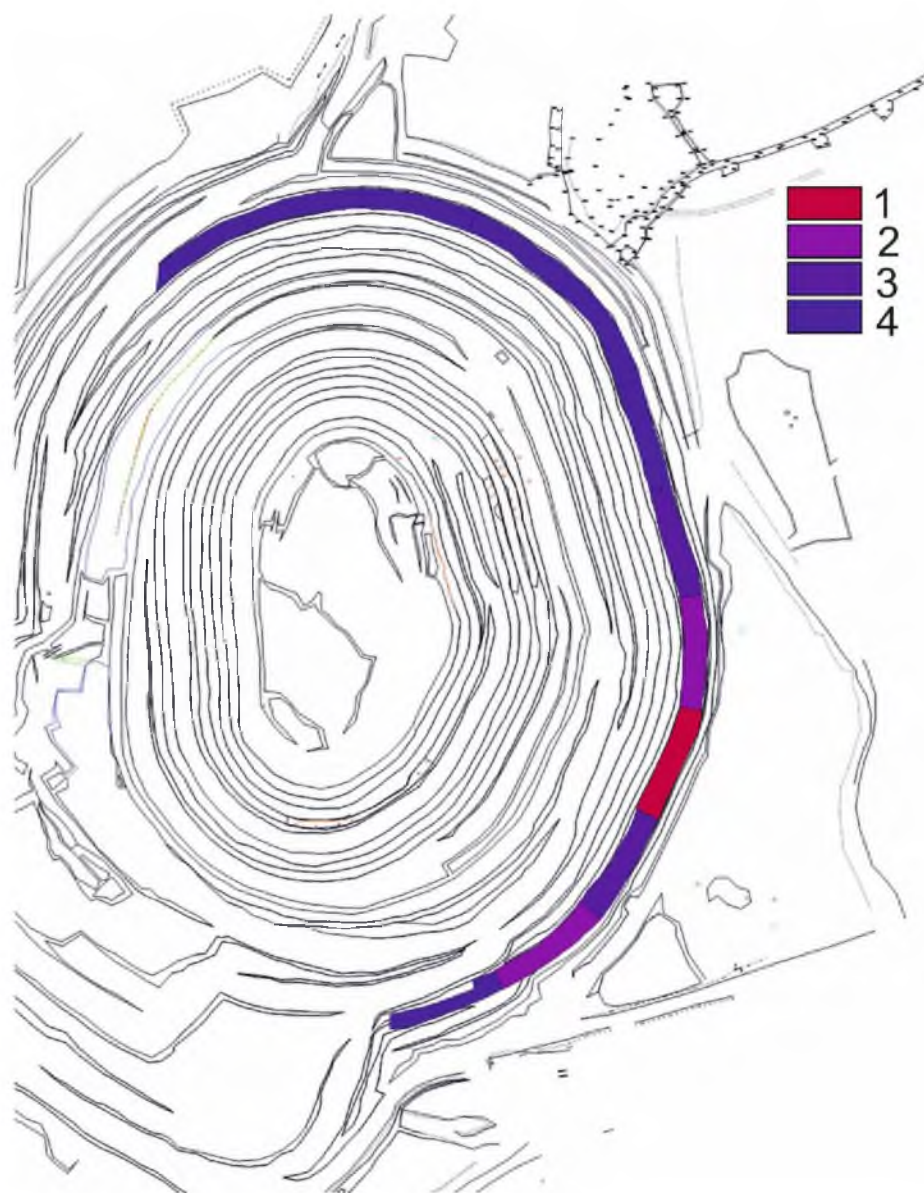


Рисунок 4.33. Карта-схема плотности форм экзогенных геологических процессов +220, горизонта карьера «Нюрбинский» 2017 г. Количество форм на сегмент: 1 – 8–12; 2 – 4–8; 3 – 1–4; 4 – 0–1.

Наибольшая плотность форм деформаций характерна для юго-восточного борта карьера – от 4–8 до 8–12 форм в сегменте. Северный борт и северо-восточный сегмент показали относительную стабильность состояния в 2017 году.

Таким образом, в результате детального рассмотрения ситуационного состояния месторождения в первый период эксплуатации, учета унаследованных проблем с деформациями в пределах юго-восточного борта карьера 2014 г., последовательного анализа состояния геологической среды месторождения за период наблюдений 2015 – 2017 гг., установлено следующее:

1. В пределах борта карьера преобладают процессы выветривания обнаженных горных пород. Широко распространены осыпи, обвалы, вывалы – те проявления, которые развиваются в процессе формирования профиля откоса уступа. Развитие процесса сопровождается формированием трещин бортового отпора вдоль верхней бровки уступов. Гранулометрический состав осей и обвалов различен: от крупных глыб до пылевой фракции и зависит не только от свойств и состава коренных пород и степени их литификации, но также и от тектонической раздробленности массива. При формировании вывалов крупных блоков горной породы и обвалов определяющим фактором является тектоническая раздробленность массива горных пород.

2. Эрозионные процессы распространены локально. Крупные эрозионные формы были зафиксированы в северной части карьера, эрозионные формы в виде промоин пересекают несколько горизонтов карьера. Встречены крупные эрозионные формы со значительными по глубине (до 2,5 м) и ширине (до 3 м) размерами (осень 2017 г.) и со следами прохождения крупных водных потоков. Активизация эрозионного процесса связана с поступлением талых вод и выпадением атмосферных осадков в летний период. Влияние эрозии на устойчивость конструктивных элементов карьера сводится главным образом к водонасыщению горного массива и, как следствие, снижению его прочностных свойств. Зачастую совместно с эрозией интенсивно проявляются осыпи и оползни.

3. Гидрологическая ситуация поверхностных вод +250-го горизонта карьера «Нюрбинский» меняется от сезона к сезону, сохраняет свою динамичность и нуждается в постоянном контроле.

4. В результате дополнительного увлажнения горных пород в северной части карьера произошло снижение прочностных свойств грунтов, сошел поверхностный оползень. Постоянный контроль состояния компонентов геологической среды месторождения позволяет констатировать отсутствие глубоких оползневых деформаций в северо-восточном сегменте карьера. Не выявлено свежих оползневых форм, характеризующих деструктивные процессы внутри массива горных пород.

В результате последовательного анализа построенных для каждого этапа исследований карт-схем плотности форм экзогенных процессов видно, что целостность конструктивных элементов и устойчивость бортов карьера в перекрывающих отложениях определяется сочетанием структурно-тектонических особенностей участка,

литологией пород в разрезе и эффективной работой водоотведения поверхностных вод от карьера. Повышенная плотность проявления форм экзогенных процессов в большей степени совпадает со структурно-тектоническими зонами дробления, как наиболее ослабленными зонами горных пород. Из сезона в сезон прослеживается подобная закономерность территориального наложения плотности форм и зон дробления – тектонической трещиноватости. В то же время влажностной режим грунтов в пределах бортов карьера от сезона к сезону меняет степень активности экзогенных процессов по периметру карьера, что отражают ситуационные карты-схемы распространения ЭГП.

Факторы, определяющие состояние бортов карьера

Разработка месторождений открытым способом в современных условиях с необходимостью обеспечения высокой производительности работ по добыче алмазов нацелена на недопущение развития чрезвычайных ситуаций на производстве и увеличение объемов добычи. Одним из важных вопросов в обеспечении бесперебойной работы карьера является оценка состояния геологической среды, ее стабильности и устойчивого состояния конструктивных элементов бортов карьера. Как правило, в основу расчетов коэффициента устойчивости при проектировании положена теория предельного равновесия склона, соотношение удерживающих и смещающих сил. При проектных расчетах используются показатели физико-механических свойств горных пород: угол внутреннего трения и угол сцепления, которые получены опытным путем из образцов горных пород. Показатели физико-механических свойств в естественных условиях в массиве горных пород меняются во времени, трансформируясь под воздействием процессов выветривания и факторов техногенеза на площадке месторождения. Устойчивость борта карьера при эксплуатации корректируется факторами, понижающими показатель расчетной устойчивости в результате эволюционных изменений геологической среды.

Проблема получения, разработки и обоснования показателей, отражающих ослабление удерживающих сил сложная и многофакторная. Разработкой параметров понижающего коэффициента занимаются многие научные коллективы мира с применением модельного подхода и дальнейшего сопоставления полученных моделей с природными объектами. В большинстве случаев, показатели коэффициента устойчивости верифицируются опытным путем, поскольку носят выраженно региональный и даже локальный характер. В расчетах необходимо учитывать многие природные факторы, особенности литологии при выветривании, дополнительные нагрузки от транспорта и другие факторы. Проблема изменения состояния горных пород за период эксплуатации месторождения для территорий распространения многолетнемерзлых пород актуальна

еще и потому, что геокриологические условия вносят свою специфику в распределение сил смещений в мерзлом и талом массиве. Аспект температурного состояния горных пород очень важен при оценке устойчивости бортов карьера, особенно слабосцементированных перекрывающих мезозойских пород значительной мощности.

Устойчивость откосов карьеров зависит от естественных факторов – литологического, структурно-тектонического, экзогенного (гипергенного) и гидрогеологического. Литологический и структурно-тектонический факторы являются основополагающими факторами устойчивости откосов. Показатели этих факторов практически не изменяются во времени и пространстве. Литологический фактор определяется физико-механическими характеристиками массива горных пород, составом и свойствами слагающих массив литологических разностей. Структурно-тектонический фактор зависит от раздробленности горного массива разрывными нарушениями разного порядка, ориентации разломов и делимости породного массива на блоки. Экзогенный (гипергенный) и гидрогеологический факторы – факторы, воздействие которых ослабляют устойчивость откосов, в отличие от литологического и структурно-тектонического факторов, являются быстро меняющимися факторами, способными к быстрому пространственно-временному перемещению. Экзогенный и гидрогеологический факторы требуют пристального внимания и проведения мониторинговых исследований.

Гипергенный фактор (совокупность процессов преобразования горных пород верхней части литосферы) проявляется в воздействии на исходные горные породы физического, химического выветривания и других экзогенных процессов, связанных с воздействием атмосферы и гидросферы. По опубликованным данным известно, что прочность горных пород в результате циклического промерзания – оттаивания снижается. Так, в работах В.И. Слепцова, А.С. Курилко представлена математическая модель процесса теплообмена уступа карьера с атмосферой, которая позволяет прогнозировать температурное поле массива многолетнемерзлых горных пород и показывает зависимость толщины слоя осыпания с поверхности откоса борта карьера от времени воздействия процесса физического выветривания. Анализировались карбонатные вмещающие породы карьера «Удачный». После пяти циклов замораживания–оттаивания в воздушно-сухом состоянии прочность (испытание одноосным сжатием) составила на 12 % ниже первоначального значения, а после 40 циклов – на 26 %. В водонасыщенном состоянии прочность образцов в зависимости от пористости снизилась от 30 до 50 %. Чем выше пористость образца, тем больше потеря прочности после нескольких циклов замораживания–оттаивания [Слепцов, Курилко, 2013].

Гидрогеологический фактор проявляется в воздействии на массив горных пород в виде гидродинамического давления и взвешивания. Обводнение горных пород, повышение их влажности приводит к снижению прочностных характеристик горных пород и активизации экзогенных процессов. Влияние гидродинамического давления и взвешивания на устойчивость скальных пород незначительно [Фисенко, 1965]. Механическое воздействие связано с физическим разрушением породного массива под влиянием вод, стекающих по поверхности откосов. Особенно сильно оно проявляется в верхней зоне дезинтеграции массива. Кроме того, важную роль играют процессы температурного выветривания, связанные с многократным попеременным замораживанием и оттаиванием воды в трещинах массива, что приводит к их расширению и росту. Вполне вероятны также проявления суффозии – механического вымывания разрушенного материала заполнителя трещин.

В реальных условиях на устойчивость конструктивных элементов бортов карьера влияние оказывает активность развития экзогенных геологических процессов, увеличивая тем самым раздробленность массива и меняя параметры борта. И в то же время развитие и проявление экзогенных геологических процессов являются своего рода индикаторами состояния геологической среды месторождения кимберлитов. В специфических инженерно-геологических условиях Накынского поля кимберлитовых месторождений присутствует опасность формирования медленных хрупкопластических смещений в верхней части разреза с возможностью вовлечения в движение значительных по мощности и объемам масс горных пород, опасность деформации конструктивных элементов борта карьера.

Инженерно-геологическое районирование бортов карьера «Нюрбинский»

По результатам инженерно-геологического мониторинга состояния конструктивных элементов карьера, температурного режима грунтов, с учетом анализа ситуационных экзогеодинамических карт-схем распространения экзогенных геологических процессов и карт-схем плотности форм экзогенных процессов, выполнено инженерно-геологическое районирование бортов карьера по состоянию геологической среды месторождения.

При районировании бортов карьера Нюрбинский учитывалась информация по трансформации геологической среды за период эксплуатации природно-технической системы, особенности литологического строения верхних горизонтов карьера, сложенных мезозойскими горными породами, тектоническая неоднородность горных пород кимберлитового месторождения, распространение экзогенных геологических процессов и их активность во времени, положение участков техногенного обводнения.

Влияние наиболее динамичного гидрогеологического фактора определяется положением в пределах карьера участков, испытывающих увлажнение горных пород. При проникновении воды с +250-го горизонта происходит увлажнение горных пород верхних горизонтов карьера. С наступлением отрицательных температур воздуха переувлажненные зоны карьера испытывают воздействие морозного выветривания, что приводит к интенсивному растрескиванию и дроблению обнаженных горных пород в откосе. Интенсивная дезинтеграция горных пород сопровождается увеличением обвально-осыпных явлений. Как правило, участки интенсивного увлажнения борта карьера территориально примыкают к системе водоотведения – водоотводным и водосборным каналам, расположенным на +250-м горизонте.

В пределах верхних горизонтов бортов карьера (до границы мезозоя и палеозоя) выделены районы: устойчивого состояния геологической среды, предельного равновесия состояния геологической среды, неустойчивого состояния геологической среды. Выполнено районирование верхних горизонтов бортов карьера «Нюрбинский» на период 2018 г. (рис. 4.34).

I. Район устойчивого состояния геологической среды. Геологическая среда находится в устойчивом состоянии, соотношение компонентов природно-технической системы сбалансировано. Оцениваемый участок борта карьера расположен вне зон структурно-тектонической раздробленности массива, присутствуют единичные проявления экзогенных геологических процессов, отсутствует дополнительное увлажнение горных пород.

II. Район предельного равновесия геологической среды. Компоненты природно-технической системы, активно взаимодействуя, приводят в развитие экзогенных геологических процессов. На оцениваемых участках выделены зоны структурно-тектонической неоднородности с активным проявлением экзогенных геологических процессов, а также области дополнительного техногенного увлажнения горных пород. Устойчивость конструктивных элементов характеризуется предельным равновесием, т.е. соотношением равнозначных удерживающих и смещающих сил. Незначительные изменения во вкладе одного из процессообразующих факторов способны привести к смещению сил напряжений, проявлению деформаций, снижению устойчивости конструктивных элементов бортов карьера.

III. Район неустойчивого состояния геологической среды. Район, в пределах которого наблюдается активное проявление экзогенного процесса или комплекса экзогенных геологических процессов, демонстрирующих высокую динамику во времени, сохраняющие потенциал переход к катастрофическим (стремительным) деформациям,

потере целостности и устойчивости конструктивных элементов. Компоненты природно-технической системы, взаимодействуя друг с другом, вызывают развитие негативных (деструктивных) процессов и явлений, приводя к перестройке всей геосистемы. Оцениваемые участки, находящиеся в подобном состоянии, нуждаются в применении немедленных мероприятий по стабилизации деформаций, принятии технических решений по повышению устойчивости конструктивных элементов борта карьера.

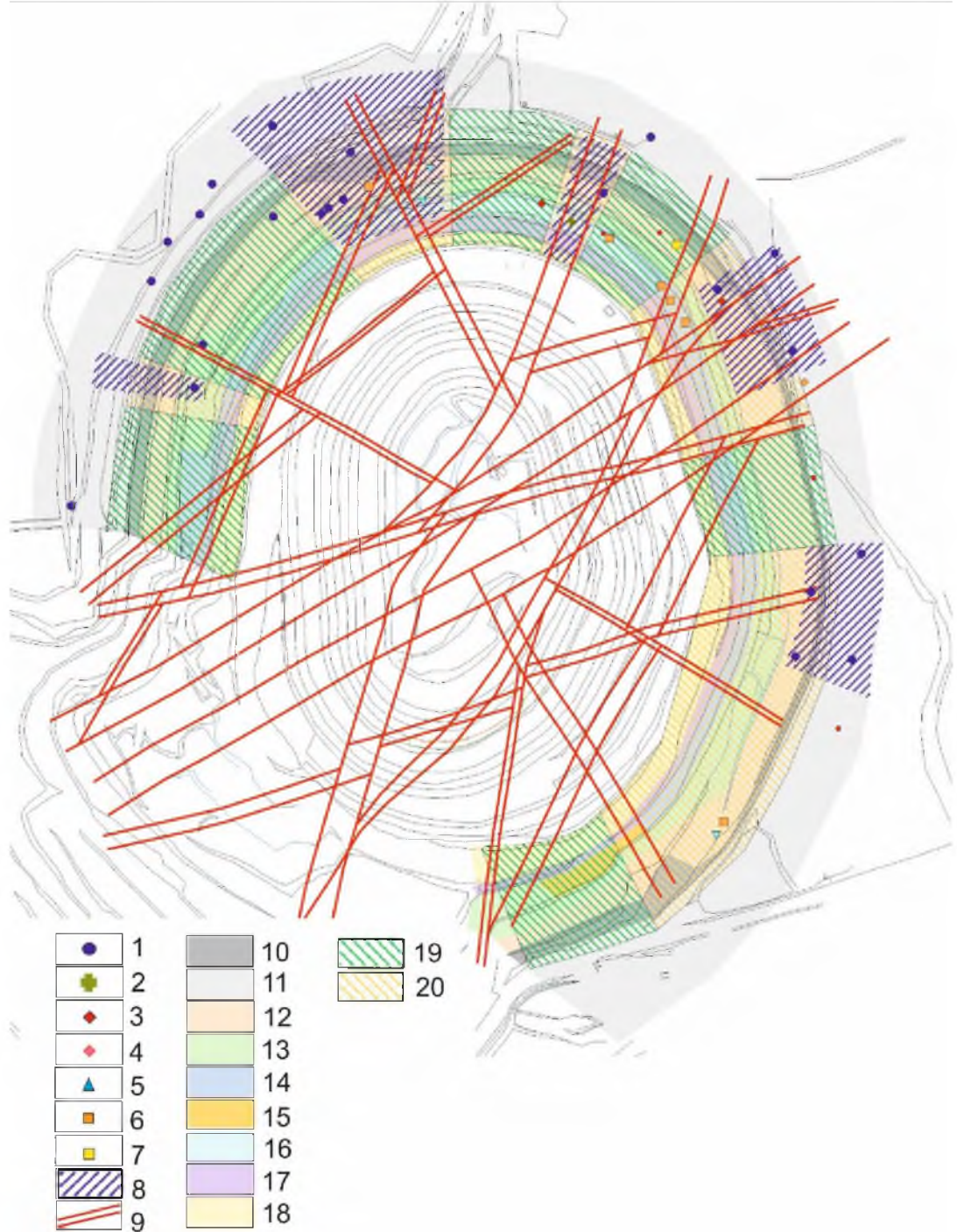


Рис. 4.34. Инженерно-геологическое районирование верхних горизонтов бортов карьера «Нюрбинский» по состоянию геологической среды месторождения.

1 – разгрузка подземных вод; 2 – оползень; 3 – просадка; 4 – трещина; 5 – эрозия; 6 – обвал; 7 – осыпь; 8 – область увлажнения горных пород; 9 – зоны структурно-тектонической неоднородности. Геология: 10 – маломощные суглинки, супеси; 11 – алевролиты сунтарской свиты ($J_1 sn^4$); 12 – алевролиты сунтарской свиты ($J_1 sn^{2-3}$); 13 – аргиллиты сунтарской свиты ($J_1 sn^1$); 14 – алевролиты, песчаники тюнской свиты ($J_1 tn$); 15 – алевролиты укугутской свиты ($J_1 uk^2$); 16 – алевролиты укугутской свиты ($J_1 uk^1$); 17 – глины, алевролиты дяхтярской свиты ($T_3-J_1 dh$); 18 – дресвяно-щебенистый материал кор выветривания (T_{2-3}). Инженерно-геологические районы состояния геологической среды: 19 – стабильного состояния, 20 – предельного равновесия, 21 – нестабильного состояния.

Юго-восточный сектор борта карьера, выделенный как район с состоянием предельного равновесия геологической среды, характеризуется активным развитием осыпей и обвалов на конструктивных элементах борта карьера, а также дополнительным локальным увлажнением горных пород.

Северо-восточный сектор борта карьера оценен как участок с равновесным состоянием геологической среды, поскольку имеет сгущение плотности структурно-тектонических элементов, проявление обвалов, вывалов, а также дополнительное техногенное увлажнение горного массива. Узкий северный сектор карьера маркирует трещиноватую зону с активным развитием пластических деформаций, связанных с литологическими особенностями горных пород и наличием дополнительного увлажнения участка. На участке в 2017 – 2018 гг. зафиксировано активное развитие эрозионных и оползневых процессов. Эрозионные процессы являются следствием поступления поверхностных вод в карьер. Площадь оползневых деформаций на участке составила 1154 м², объем сместившихся масс грунта около 1700 м³, отступление по поверхности бермы составило более 7 м (проектная ширина предохранительной бермы 15 м).

Северо-западный сектор определяется предельным равновесием геологической среды в связи с наличием пересечения разломных зон, повышенной тектонической раздробленности горных пород и интенсивного обводнения. На участке зафиксирована разгрузка подземных вод в основании откоса +235-го горизонта и наличие эрозионных форм.

Узкий западный сектор выделен как участок в состоянии предельного равновесия, поскольку расположен на контакте со структурно-тектонической зоной и имеет дополнительное техногенное увлажнение. Область увлажнения выделена по зафиксированной разгрузке грунтовых вод на +205-м горизонте, увлажнению откосов и берм верхних горизонтов.

Районов с неустойчивым состоянием конструктивных элементов, требующих экстренных инженерно-технических решений по стабилизации, не выделено.

Районирование верхних горизонтов бортов карьера «Нюрбинский» позволяет рассмотреть уязвимость инженерных объектов (водоотводящей системы, транспортных артерий) вследствие развития негативных процессов – обвалов, осыпей, оползней, эрозии.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

Современное состояние геологической среды алмазоносного месторождения определяется особенностями строения Виллойско-Мархинской структурно-тектонической зоны, физико-механическими свойствами вмещающих и перекрывающих горных пород, гидрологической и гидрогеологической ситуацией, развитием техногенно спровоцированных экзогенных геологических процессов.

Эволюционные преобразования компонентов геологической среды в результате эксплуатации карьера приводят к развитию экзогенных геологических процессов на конструктивных элементах бора карьера. На верхних горизонтах карьера сложенных терригенными породами мезозоя активно проявляются обвалы, осыпи, эрозия, оползни и заложение оползневых деформаций с возможным вовлечением в смещения значительного объема горных пород. В 2014 году сложилась сложная инженерно-геологическая обстановка, при которой были зафиксированы медленные деформации части верхних горизонтов юго-восточного борта в сторону карьера. По предварительным заключениям в медленные оползневые смещения с глубиной захвата до 40–50 м могли быть вовлечены значительные объемы горных пород. Принятые меры по стабилизации ситуации, водоотведению и контролю состояния геологической среды показали свою эффективность и не допустили развитие опасного геологического процесса с деформацией конструктивных элементов борта карьера. Проявление поверхностного оползня в перекрывающих слаболитифицированных мезозойских отложениях, объемом около 1700 м³, отмечено в северной части борта карьера и привело к разрушению целостности конструктивных элементов +190, +175-го горизонтов и частичному перекрытию оползневыми массами бермы +160-го горизонта.

Мониторинг температурного режима горных пород месторождения показал сплошное распространения многолетнемерзлых пород, отсутствие в разрезе таликовых зон. Мощность сезонного слоя промерзания–протаивания на техногенно-преобразованной площадке (каменная наброска) карьера достигает более 2 м. Ниже зоны сезонных и многолетних теплооборотов (4 - 13м) горные породы мерзлые, их температура находится в диапазоне от –2 до –1 °С. Высокотемпературные горные породы чувствительны к внешним воздействиям и способны за короткий период перейти в талое состояние.

Анализ экзогеодинамических обстановок на месторождении показал высокую динамичность компонентов природно-технической системы, смену ситуационных состояний геологической среды от сезона к сезону. Целостность конструктивных элементов карьера зависит от активности и интенсивности проявления экзогенных геологических процессов, сопровождающих эксплуатацию месторождения.

На основе комплексного анализа состояния геологической среды за период эксплуатации месторождения, результатов мониторинга состояния конструктивных элементов бортов карьера, температурного режима грунтов, с учетом ситуационных экзогеодинамических карт-схем распространения экзогенных геологических процессов и карт-схем плотности форм экзогенных процессов (2015 – 2017 гг.), проведено инженерно-геологическое районирование бортов карьера, отражающее состояние геологической среды на этапе эксплуатации 2018 г. Карта-схема районирования бортов карьера по состоянию устойчивости геологической среды представляет собой краткосрочный прогноз, дает представление о возможном развитии геосистемы, а так же возможность для принятия взвешенные решения при дальнейшей эксплуатации месторождения. В настоящее время борта карьера находятся в устойчивом состоянии и состоянии предельного равновесия. Районов с неустойчивым состоянием конструктивных элементов, требующих экстренных инженерно-технических решений по стабилизации на период 2018 г., не выделено.

Устойчивость бортов карьера при длительной эксплуатации алмазосного месторождения определяется сочетанием структурно-тектонических особенностей участка месторождения, раздробленностью массива, литологией пород в разрезе и их устойчивости к агентам выветривания, динамичностью гидрологических факторов и проявлением экзогенных процессов, а также эффективными управленческими решениями.

Комплексный инженерно-геологический мониторинг состояния компонентов геологической среды позволяет более надежно управлять динамичной природно-технической системой месторождения, предотвращать развитие чрезвычайных ситуаций, связанных с развитием экзогенных процессов на бортах карьера при добыче полезных ископаемых.

Глава 5. Городская территория (на примере Улан-Баторской агломерации)

Столица Монголии – город Улан-Батор – занимает площадь 4704 км². В 2014 году в городской черте проживало около 1 300 000 человек, это самый крупный город в регионе – город-миллионник и самый крупный город в Монголии. В монгольской столице проживает 1/3 всего населения страны, расположены все основные производственные и хозяйственные предприятия и объекты. «Город Улан-Батор – это 9 районов и 152 подрайона. Из них 6 районов расположены компактно. Три отдалены от «пятна» городской застройки – Налайх, Багануур, Багахангай» [Нарантуяа, 2016]. Плотность населения достигает 1,8 человека на 1 км² (<https://ru.wikipedia.org>). Современная городская агломерация Улан-Батор включает в себя плотно застроенный центр города Улан-Батора с многоэтажными суперсовременными зданиями различной этажности и периферию агломерации с частными малоэтажными постройками, юрточные поселения и примыкающие поселения городского и сельского типа.

5.1. Климатические и инженерно-геологические условия

Климатические условия

Климат территории, на которой расположена Улан-Баторская агломерация, резко континентальный, характеризуется большой амплитудой колебания суточных и сезонных температур (среднемесячная температура изменяется от –27,4 в январе до +17,1 °С в июле). Резкая смена сезонов года и высокая солнечная активность способствуют активному развитию процессов температурного выветривания и дезинтеграции горных пород. Нормативная глубина промерзания в зависимости от литологического состава пород изменяется от 2,7 м в глинах и суглинках до 4,7 м в крупнообломочных грунтах с песчаным заполнителем. Мощность снежного покрова незначительна – 2–8 см. Количество осадков в среднем незначительно – 200–300 мм в год, и их распределение неравномерно как по площади, так и по сезонам года. На территорию проникают циклоны и дождевые фронты, сопровождающиеся аномально высокими значениями интенсивности и количества атмосферных осадков, месячный максимум может достигать 227 мм (июнь, 1967), суточный максимум 91 мм (сентябрь, 1997) (по данным <http://www.pogodaiklimat.ru>). Как правило, основное количество осадков выпадает в теплый период года (май – сентябрь) и составляет 89 % от годового количества осадков [Бат, 2004].

В силу природно-климатических особенностей над территорией Улан-Батора в летний период проходят ливневые фронты, характерные для территории Центральной Монголии. Выпадение ливневых дождей над локальной территорией в большинстве

случаев формирует дождевые паводки. Дождевой паводок – одна из фаз водного режима водотоков, характеризующаяся сравнительно быстрым подъемом и спадом расходов и уровней воды, иногда существенным, превышающим расходы весеннего половодья. Образуются дождевые паводки не регулярно и не ежегодно. По характеру дождей ливневые паводки могут быть разделены на ливневые, ливне-дождевые и дождевые. Ливневые паводки формируются короткими, но очень интенсивными дождями. Ливне-дождевые паводки образуются в результате ливневых дождей большой продолжительности и высокой интенсивности. Дождевые паводки вызываются обложными дождями большой продолжительности, но сравнительно малой интенсивности [Горшков, 1979].

Проведенный анализ климатического фактора периода 2009–2011 гг. показал, что климатические условия каждого года весьма индивидуальны. Так, за период ливневого стока 2009 г. количество дней с осадками не менее 10 мм составило 2 дня; с количеством осадков не менее 20 мм/сут – 3 дня; с количеством осадков не менее 30 мм – 1 день (рис. 5.1, *а*). При этом максимальное суточное количество дождя – 50 мм в июле. Мощность снежного покрова: максимальная глубина – 4 см, а к началу периода талого стока – снег глубиной – 2 см.

Период ливневого стока 2010 г. (рис. 5.1, *б*) отличался от предыдущего года увеличением до 2 числа дней с количеством осадков не менее 30 мм в сутки. Максимальное их количество составило 32 и 37 мм. Максимальная глубина снега составила 6 см с уменьшением до 3 см к началу периода талого стока.

Период ливневого стока 2011 г. по неполным данным (рис. 5.1, *в*) характеризовался снижением до 1 числа дней с количеством осадков не менее 20 мм и до 1 дня – с количеством осадков не менее 30 мм. Максимальное количество осадков составило 42 мм. Глубина снега зимой 2011 г. была максимальна за весь анализируемый период и составила 8 см, к началу талого стока снизилась до 3–4 см.

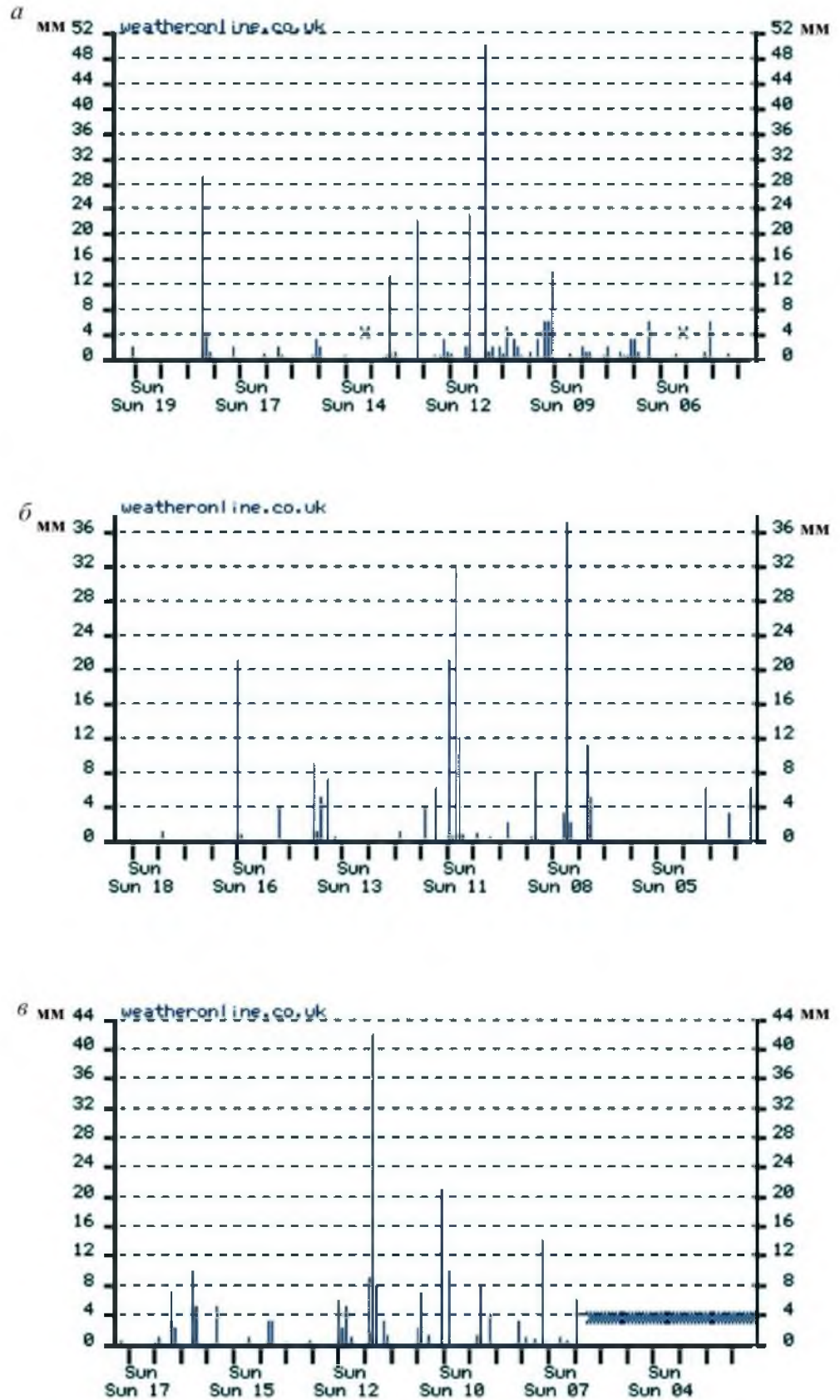


Рисунок 5.1. Суточное количество осадков в период ливневого стока на территории Улан-Батора (1306 м) (по данным www.weatheronline.co.uk): *a* – в период 15 апреля – 15 сентября 2009 г.; *b* – в период 15 апреля – 15 сентября 2010 г.; *c* – в период 15 апреля – 15 сентября 2011 г.

Анализ количества дождевых осадков за период (2010–2014 гг.) по метеостанциям Алтан-Булаг, Буан-Укха, Монгун-Морт и Улан-Батор показал, что количество дней с осадками не менее 10 мм в 2010 г. составляло 10, а в 2013 г. увеличилось до 21 (рис. 5.2); с осадками не менее 20 мм в сутки – от 3 дней в 2010 г. до 6 в 2011 и 2013 гг.; с осадками не менее 30 мм – от 1 до 2. Максимальное суточное количество осадков отмечено 7 июля 2014 г. (в районе метеостанции Монгун-Морт) – 85,3 мм.

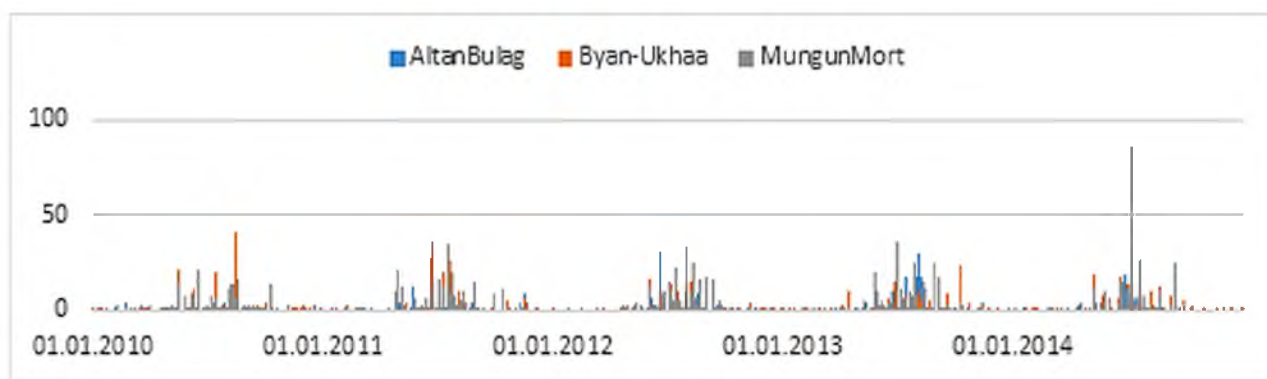


Рисунок 5.2. Суточное количество осадков в районе г. Улан-Батора (1306-1263 м) (по данным метеостанций Алтан-Булаг (698 м), Буан-Укха (1715 м), Монгун-Морт в период с 1.01.2010 г. по 31.12.2014 г).

Таким образом, суточный максимум жидких осадков может достигать 50 и более мм, что соответствует ливням и ливне-дождям высокой интенсивности. В то же время могут возникать периоды затяжных дождей продолжительностью 10–21 день с осадками не менее 10 мм в сутки. Эти осадки малой интенсивности и длительной продолжительности соответствуют дождевым паводкам. Дождевой фронт над территорией Улан-Баторской агломерации распространяется крайне неравномерно, локализуя значительное количество осадков на малых площадях. В течение суток в одной части городской агломерации может выпадать суточная норма ливневых осадков, в то время как в другой части дождь незначителен или не отмечен вовсе. Ливневый фронт, локализуясь на ограниченной территории, способен провоцировать активизацию эрозионных процессов и процессов, вызванных ливневыми паводками.

Интенсивные осадки приводят к формированию высокого стока паводковых вод, развитию эрозии, затоплению и прохождению селевых потоков. При сочетании определенных параметров атмосферных осадков и геолого-геоморфологических условий территории временные водные потоки способны приобретать высокую разрушительную способность и наносить ощутимый экономический ущерб.

Геоморфологические и структурно-геологические условия

Территория, на которой расположен самый крупный город в регионе, относится к Центрально-Хэнтэйской горно-складчатой области Хэнтэйской горной провинции. Городская территория Улан-Батора находится в долине реки Туул и ее горном обрамлении. Горные сооружения тектоно-денудационного происхождения имеют крутые склоны и острые вершины. Водоразделы, расположенные в западной части территории Сонгино Хайрхан, возвышаются на 1653,3 м, на востоке – Баянзурух, высотой 1527 м. По высотному положению водораздельных поверхностей на территории Улан-Баторской агломерации выделено три области: <1500 м – низкие горы, 1500–2000 м – средневысотные, >2000 – высокие горы. Долины рек Сэлбэ, Улистай, Холийн тектонического происхождения, образованы опусканием отдельных блоков по региональным разломам меридионального простирания [Сейсмичность и районирование, 2009; Турутанов и др., 2014]. По морфогенетическому признаку на исследуемой территории выделяются денудационно-тектонические, денудационные и аккумулятивные типы рельефа.

Структурный рисунок территории района расположения Улан-Баторской агломерации представляет собой сочетание крупных блоков земной коры и разломных зон, возникновение которых относится к верхнепалеозойскому этапу тектономагматической активизации. Новейшие тектонические деформации наложены на мезозойские структуры. Тектоническая активность проявлялась и в кайнозое. Заложение Улан-Баторской впадины произошло в нижнемеловое время, в кайнозое продолжается ее унаследованное развитие на фоне медленных поднятий обрамляющих сводово-глыбовых и горстовых структур [Рященко, 2011]. Территория, занятая Улан-Баторской агломерацией, имеет сложное блоковое строение, обусловленное разнонаправленными движениями по разломам. Главным элементом в структурно-тектонической структуре территории является система субпараллельных, иногда подходящих друг к другу под острым углом разломов. Наиболее крупные котловины впадины (Тольская и Сэльбинская) имеют субширотное и субмеридиональное направление. Развитие котловин связано с разломами или системами разрывных нарушений. Фундамент впадины образуют породы осадочно-метаморфической карбонатной формации (сланцы, песчаники и прослоями туффитов и яшм, алевролиты и аргиллиты со следами метаморфизма), осложненной в мезазое внедрением гранитоидных интрузий. Верхняя часть разреза грабен-долины выполнена глинистыми образованиями неоген-четвертичных комплексов мощностью до 50 м [Сейсмичность и районирование, 2009; Рященко, 2011].

В геологическом строении участвуют отложения девона (D₁₋₂ и D₂₋₃):

метаморфизованные песчаники, алевролиты, туфопесчаники, туффиты; отложения юры (J₂₋₃): граниты, гранит-порфиры с биотитом, мусковит (см. рис. 1.2., Глава 1.). Отложения карбона (C₁₋₂ и C₂₋₃) представлены метаморфизованными песчаниками, филлитовыми сланцами, алевролитами, конгломератами, известняками; отложения мела (K₁) представлены песчаниками, алевролитами, конгломератами, гравелитами, неогена (N₂) – глиной, галькой, песками, слабосцементированными брекчиями, конгломератами, гравелитами и суглинками; четвертичные отложения – различного генезиса дресвой, щебнем, галькой, песком, супесью и суглинком [Турутанов и др., 2014].

По результатам инженерно-геологических исследований на территории Улан-Батора были выделены геолого-генетические комплексы [Пояснительная записка, 1986; Сейсмичность и районирование, 2009]:

- делювиальный, распространен на склонах, представлен щебенисто-дресвяным грунтом с супесчаным и песчаным заполнителем. Мощность – около 8 м, грунты не пучинистые;

- делювиально-пролювиальный, покрывает склоны Маахуур толгой, Гандан и Тасган-Овоо, а также пади Зайсан и Тэнгэрийн Ам. Представлен преимущественно щебенисто-дресвяным материалом с супесчано-суглинистым заполнителем. Содержание дресвы и щебня в них от 25 до 48 %, грунты не пучинистые;

- терригенно-флишевый (элювий), распространен практически повсеместно. Кровля скальных горных пород неровная, с поверхности песчаники и сланцы, граниты выветрелы, трещиноваты и разрушены до состояния глыб, щебня и дресвы. Мощность зоны выветривания коренных горных пород превышает 10–20 м.

- пролювиальный, приурочен к днищам и прибортовым частям оврагов и балок. Представлен суглинками. Мощность – от 1 до 4 м. Суглинки природного сложения – от твердого до текучепластичного состояния – относятся к средне- и сильнопучинистым грунтам.

Делювиальные и пролювиальные отложения покрывают чехлом коренные горные породы, мощность рыхлых отложений на склонах составляет 1–4 м, а зона выветрелых пород может достигать 20 м. В результате интенсивных осадков рыхлые и переувлажненные отложения геолого-генетических комплексов подвержены размыву временными водными потоками и способны в виде твердой фазы пополнить водные потоки образуя тем самым разные типы селей.

По долинам рек Туул, Сылбэ, Улистай, Толгойт залегают аллювиальные и аллювиально-пролювиальные комплексы. В долине Туул гравийно-галечные и суглинистые отложения имеют мощность 20–35 м, по долинам Сылбэ и Улистай валуны,

галька с супесчаным и суглинистым заполнителем, линзами глин и песков – до 70 м и более [Сейсмичность и районирование, 2009].

Гидрогеологические особенности территории города Улан-Батора обусловлены распространением подземных вод в аллювиальных и аллювиально-пролювиальных отложениях речных долин, пластовых вод неогеновых и меловых отложений, присутствием трещиноватых вод палеозойских пород и гранитов. Распространение подземных вод по площади неравномерно.

В геокриологическом отношении территория города относится к области многолетнемерзлых грунтов редкоостровного распространения. Криогенные процессы на территории города имеют активное распространение и в большей мере приурочены к зонам тектонических нарушений и долинам рек. В пределах городской территории отмечено морозное пучение, морозобойное растрескивание, формирование наледей [Бат, 2004].

Этапы городской застройки территории

Город Улан-Батор, историческое поселение Урга («Великий Монастырь»), возник в XVII веке на территории долины реки Туул как место постоянного проживания лам, монахов и духовенства Монголии. В 1911 г. поселение Урга получило статус столицы государства Монголии, а в 1924 г. с провозглашением Монгольской Народной Республики переименовано в город Улан-Батор. К началу XX столетия население города достигало 25 тыс. человек (рис. 5.3). В то время на территории города были возведены легкие постройки – сборно-разборные войлочные юрты, зачастую без фундамента, и глинобитные дома, которые располагались вдоль рек Туул и Сэлбэ (<https://ru.wikipedia.org>).



Рисунок 5.3. Панорама Урги, 1888 г. (гравюра с фото Н.А. Чарушина), <https://ru.wikipedia.org>.

С момента первого исторического упоминания техногенная нагрузка на геологическую среду возрастала постепенно. В освоении территории долинного пространства реки Туул условно, на основе опубликованных материалов [Нарантуяа, 2016], можно выделить несколько этапов:

1-й этап («начальный») – период до 30-х годов прошлого столетия. Когда территории впервые осваивалась, преобладало юрточное строительство, места для проживания выбирались с учетом традиционной формы расселения, культуры монгольского этноса и религиозных воззрений. Этому периоду свойственно минимальное преобразование геологической среды, «интуитивный» выбор местоположения жилищ. «Улан-Батор был войлочным городом, и только в 1930 году в нем стали появляться деревянные постройки (храмы, монастыри). Тогда при застройке использовались такие материалы, как глина, дерево, войлок» [Нарантуяа, 2016].

2-й этап («становление») – 30–50-е годы. Этот этап включает период начала градостроительного развития. Сформировалась первая улица – основная ось будущего городского пространства, возникла площадь, реконструированы старые и возникли новые улицы. В это время нагрузки на геологическую среду выражались в минимальном преобразовании дневной поверхности пространства и затрагивали мощность первых метров, носили точечный характер. Основные виды застройки представляли из себя юрты с земельными участками и глинобитные дома, единичные каменные строения.

3-й этап («советский») – 60–90-е годы прошлого столетия. В 1954 году принят первый генеральный план развития города Улан-Батора на 20 лет. На протяжении этого этапа принималось последовательно несколько генеральных планов развития города с учетом роста населения и хозяйственно-промышленного освоения территорий. Вносились корректировки, уточнения, и утверждались новые генпланы: после 1960 года, в 1976 – третий генплан, в 1986 утвержден четвертый генеральный план.

Для третьего этапа освоения территорий характерно массовое строительство жилых зданий с активным участием советских специалистов. Проводились инженерно-геологические исследования и изыскания под строительство зданий и хозяйственных объектов с учетом сейсмических особенностей района и геологического строения участков. Выполнена застройка целых кварталов по советской технологии – типовые 3–5-этажные сейсмоустойчивые здания с организацией просторных дворов и общественных зон, широкими улицами и проспектами. Первые микрорайоны возведены в центре Улан-Батора московским «Гипрогором».

В городской черте были возведены направляющие стены для сдерживания и регулирования потока горных рек во время паводков и берегозащитные сооружения.

Построены высокие и широкие мостовые переходы, с учетом пропуска воды во время поднятия уровня воды в реках. На крупных городских автомагистралях и проспектах сконструированы и запущены в работу подземные пешеходные переходы. Возведены крупные памятники и постаменты, организованы парки. Выполнено укрепление склонов от эрозионных размывов – развития струйной эрозии в пределах городских магистралей (проспект Мира).

Преобразования компонентов геологической среды территории – перепланировка поверхности, организация дренажной сети, уплотнение грунтов – на третьем этапе освоения территории связаны со строительством высотных зданий на ленточных и свайных фундаментах, возведением опор мостов и магистралей, организацией подземных переходов. При реализации типовой застройки города руководствовались существующими на тот период советскими СНиПами и ГОСТами, в которых максимально была учтена литология пород и морфология рельефа, сейсмичность территории. В Монголии начиная с 1957 года проводились российско-монгольские систематические исследования сейсмической активности региона. Созданы карты сеймотектоники и общего сейсмического районирования территории Монголии, которые служили основой для оценки сейсмической опасности районов и объектов высокой экономической значимости в более крупном масштабе. Особый акцент был сделан на изучении состояния и свойств грунтов, тестировании моделей их поведения при сейсмическом воздействии разной силы, микрорайонировании [Опасные геологические процессы..., 2017]. Большинство зданий в пределах городской территории были построены с учетом сейсмичности и развития опасных геологических процессов.

4-й этап («рыночно-экономический») – с 90-х годов по настоящее время. В 2002 году принят пятый генеральный план развития города. Рыночная система принесла свободу экономических отношений в Улан-Батор. Однако введение данной системы привело к проблемам во всех секторах, особенно в градостроительстве, так как рыночный механизм предполагает существование частной собственности на землю. Это затрудняло планирование и регулирование использования земель. Для этого этапа освоения характерно интенсивное уплотнение «советской» застройки новыми зданиями повышенной этажности, возводятся многоэтажные здания внутри дворового пространства, коммерческие постройки. Строятся магистральные развязки и крупные мостовые переходы, опоры. В то время окрестности городской территории по-прежнему осваиваются самобытно, без учета плана застройки и генерального плана города. «Развитие города сопровождалось бурной миграцией с формированием юрточного пояса, в котором проживает более половины населения Улан-Батора. Функционально-

планировочная организация среды на территории юрточного пояса не выдерживает критики. Эта территория представляет собой трущобы, лишенные всех видов инфраструктуры» [Нарантуя, 2016]. Юрточные поселения вокруг Улан-Батора все больше захватывают предгорные пространства, склоны, смещаясь в нагорную часть. Часто территории юрточных поселений расположены в зонах активного развития эрозионных форм (рис 5.4).



Рисунок 5.4. Городская территория с юрточной застройкой (фото 2017 г.).

Таким образом, геологическая среда территории городской агломерации в современных условиях испытывает комплексное воздействие от прямого преобразования земной поверхности, различных техногенных нагрузок от хозяйственно-производственных объектов в черте города и внешних природно-климатических факторов. К настоящему времени территория плотно застроена и используется в разных народно-хозяйственных целях (рис. 5.5).

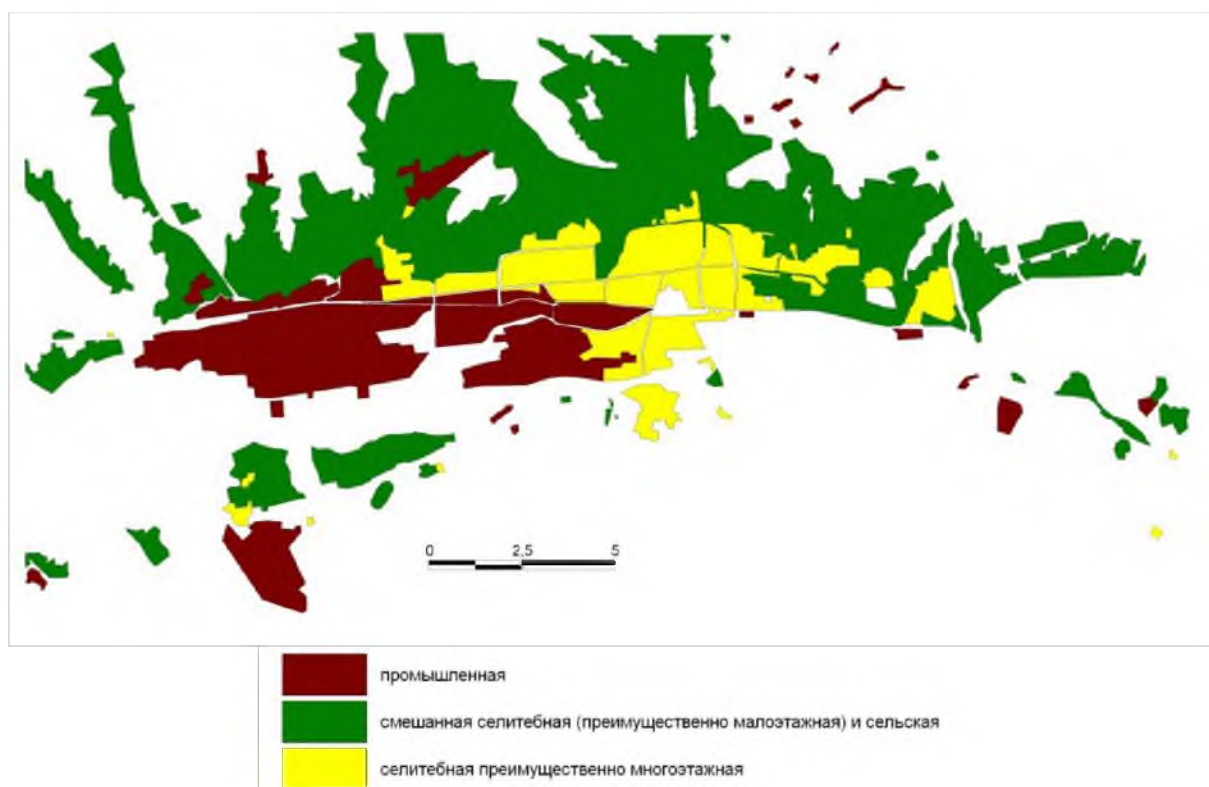


Рисунок 5.5. Виды использования территории городской агломерации Улан-Батора.

Селитебные и промышленные районы города расположены на территориях долинных комплексов, а малоэтажные и сельскохозяйственные районы все больше смещены в предгорные и горные территории. Исходя из условий морфометрии территории, природно-климатических особенностей, городские районы селитебного и сельскохозяйственного, промышленного использования подвержены влиянию геологических процессов, характерных для долинных и горных районов.

5.2. Экзогенные геологические процессы в пределах городской агломерации

На территории Улан-Баторской агломерации проявляются многие экзогенные геологические процессы. Установлено, что в силу глубокого сезонного промерзания в условиях резко континентального климата процессы выветривания имеют активное площадное развитие. На формирование мощности зоны выветривания оказывают влияние литологические особенности горных пород, циклы сезонного промерзания – протаивания, режимы увлажнения и микрорельеф поверхности. Мощность кор выветривания изменяется от первых десятков сантиметров до первых десятков метров и служит основой для развития большинства экзогенных геологических процессов.

Развитие оползневых деформаций и обвалов носит точечный, локальный характер и соответствует местам особого геологического, тектонического строения и режима обводненности. Необходимым условием развития оползневых деформаций является

наличие в разрезе слоя грунтов с пониженными физико-механическими свойствами. В основном преобладают поверхностные, неглубокие оползни – оползни-срывы, оползни-сплывы, оползни-потоки (рис. 5.6, *А*) мощностью первые метры. Обвалы, осыпи в результате дезинтеграции горных пород имеют единичные проявления и локализованы в местах их обнажения. Вертикальная трещиноватость и особенности литологического напластования горных пород способны приводить к обвалам и осыпям, особенно в местах, где склоны подрезаны техногенными выемками (рис. 5.6, *Б*).



Рисунок 5.6. *А* – оползень-срыв рыхлого материала; *Б* – вывалы крупных блоков по напластованию горных пород (левый борт реки Туул).

Часто встречающиеся виды деформации земной поверхности также связаны с эрозией. В пределах городской территории наибольшее развитие получили эрозионные процессы и процессы, связанные с действием временных водных потоков. По степени катастрофичности процессы, вызванные временными водотоками и эрозией, относятся к группе процессов перманентного (в том числе циклического) развития и скачкообразного проявления [Литвин, 1989]. Под термином «эрозия» обычно понимают разрушительную работу текучих вод, разрушение почв, горных пород [Рыжов, 2015].

Все разновидности водной эрозии наносят экономический ущерб городскому хозяйству. На территории Улан-Баторской агломерации встречаются следующие виды эрозии: линейная (овраги, промоины) и плоскостная (площадной смыв). Периодически проходят селевые паводки, вызванные ливневыми дождями и представляющие серьезную опасность [Туул, 2012]. Разрушительная деятельность временных водотоков – грозное природное явление, угрожающее целостности и безопасному функционированию социально-хозяйственных объектов городской территории.

Процессы, вызванные действием временных водных потоков (результаты инженерно-геологического мониторинга)

С проявлением процессов, вызванных экстремальными дождевыми осадками, связаны значительные ущербы в пределах Улан-Баторской агломерации. По данным Болдын Бата [Бат, 2004], в августе 1982 и в июне 2003 г. в районе города Улан-Батора зафиксированы катастрофические селевые потоки. В результате схода одного из селей произошло разрушение части юрточных и жилых построек, были человеческие жертвы. В низовьях долины рек Сэлбэ и Толгойт сель сформировал дамбу высотой до 3 м и шириной до 10 м. 435 семей остались без жилья, ущерб составил около 300 тыс. долларов [Туул, 2012]. Анализ исторических данных показал, что катастрофические паводки на территории Улан-Батора отмечались в 1778, 1915, 1966, 1982, 2000, 2003, 2004, 2009, 2015 и 2016 гг. 24 июля 2009 г. в результате наводнения погибло 26 человек. Катастрофические дождевые паводки в столице Монголии произошли 20 июня 2015 г. (сайт <http://www.medee.mn/>) и 21 июля 2016 г. Следствием катастроф в 2016 году снова стали человеческие жертвы: погибли 2 человека (сайт <http://arigus-tv.ru/>).

В пределах Улан-Баторской агломерации формы проявления эрозии встречаются повсеместно: от небольших промоин, ложбин стока до линейно вытянутых, протяженных, глубоких и активно развивающихся оврагов. Практически каждый элементарный водосборный бассейн имеет активное эрозионное русло, при этом размеры эрозионных форм изменяются в широких пределах: ширина – от нескольких до 20 м и более, глубина – более 3 м, протяженность – до 2 км и более. Все разновидности эрозии имеют следы периодической активизации (рис. 5.7).





Рисунок 5.7. Различные виды эрозионных форм в черте Улан-Баторской агломерации.

На территории городской агломерации Улан-Батора преобладают процессы, связанные с действием временных водных потоков. Оценка природных условий, предрасположенных к проявлению катастрофических процессов, связанных с прохождением временных водных потоков, одна из сложных задач при районировании городской территории, поскольку земли уже освоены, заселены. Оценить интенсивность геологического процесса в пределах города бывает технически сложно. После прохождения катастрофического процесса городскими службами практически сразу же ликвидируются его последствия, поскольку жизнь города должна быстро вернуться к комфортному состоянию. Зафиксировать формы, созданные в результате прохождения водных потоков, зачастую не удастся, потому в целях определения скорости развития эрозионных процессов в пределах водосборов и анализа среды развития процесса на локальном уровне организован мониторинг динамики процесса.

Наблюдения выполнялись на ключевых участках, расположенных в разных частях Улан-Баторской агломерации: в районе склона Наран, на склоне юго-западной экспозиции горы Сонгино хайрхан уул (Налайх), на склонах гор Толгойт и Чингэлтей, на склонах в водосборных бассейнах рек Сэлбэ и Толгойт. Ежегодные морфометрические измерения 24 поперечных профилей, расположенных на склонах в вершинных, средних и устьевых частях оврагов, демонстрируют динамику процессов, связанных с работой временных водотоков (рис. 5.8).



А

- 1

- 2



Б

- 1

- 2

Рисунок 5.8. План: А – расположения участков наблюдений в пределах Улан-Баторской агломерации. 1 – участки, организованные в 2012 г.; 2 – участки, организованные в 2013 г.; Б – элементарного водосборного бассейна на участке наблюдений № 5 (эрозионная форма): 1 – русло водотока; 2 – граница водосборного бассейна.

В ходе мониторинга установлено:

– эрозионные овраги сохраняют стабильную динамику процесса – одновременное углубление и расширение оврага, линейный рост вершины на участках с более высокими абсолютными отметками водоразделов (область средневысотных гор) и имеют большую

глубину расчленения (до 115 м) и площадь водосбора, меньшие показатели густоты расчленения (около 1,78 км/км²) в сравнении с другими водосборами. Например, участок «Налайх» (рис. 5.9) имеет стабильно высокие показатели динамики эрозионного процесса;



Рисунок 5.9. Толща делювиально-пролювиальных отложений, вскрытых эрозией на участке «Налайх».

– боковая эрозия преобладает над глубинной в эрозионных формах на склоновых участках наблюдений Хустай и Гульджин. Величина бокового приращения оврагов варьируется от 0,03 до 0,46 м в год. Расширение бортов оврагов сопровождается уменьшением их глубины. Расширение бортов оврага в поперечном профиле Mng PR-10 на 0,22 и 0,46 м привело к уменьшению глубины эрозионной формы на 0,7 м. Уменьшение глубины оврагов в поперечных створах составило 0,03–0,24 м в год. На отдельных поперечных профилях (Mng-15) в основании правого борта оврага зафиксирован боковой размыв, т. е. активная боковая эрозия;

– линейное приращение вершин большинства оврагов за период наблюдений не превысило 1 м, максимальное приращение протяженности зафиксировано в двух эрозионных формах и составило 0,89 и 0,92 м соответственно. Средний рост оврагов в год достигает величины 0,16 (от 0,03 до 0,29 м).

Анализ динамики процесса (эрозии) по этапам преобразования геологической среды во времени показал следующее:

– отмечается увеличение площади поперечных створов у большинства обследуемых оврагов в 2012 – 2015 гг. Увеличение площади варьируется от 0,21 до 2,53 м² за весь период измерений. Максимальное приращение площади створов зафиксировано в оврагах, расположенных на ключевых участках с большей водосборной площадью и большей глубиной расчленения элементарных водосборов (рис. 5.10);

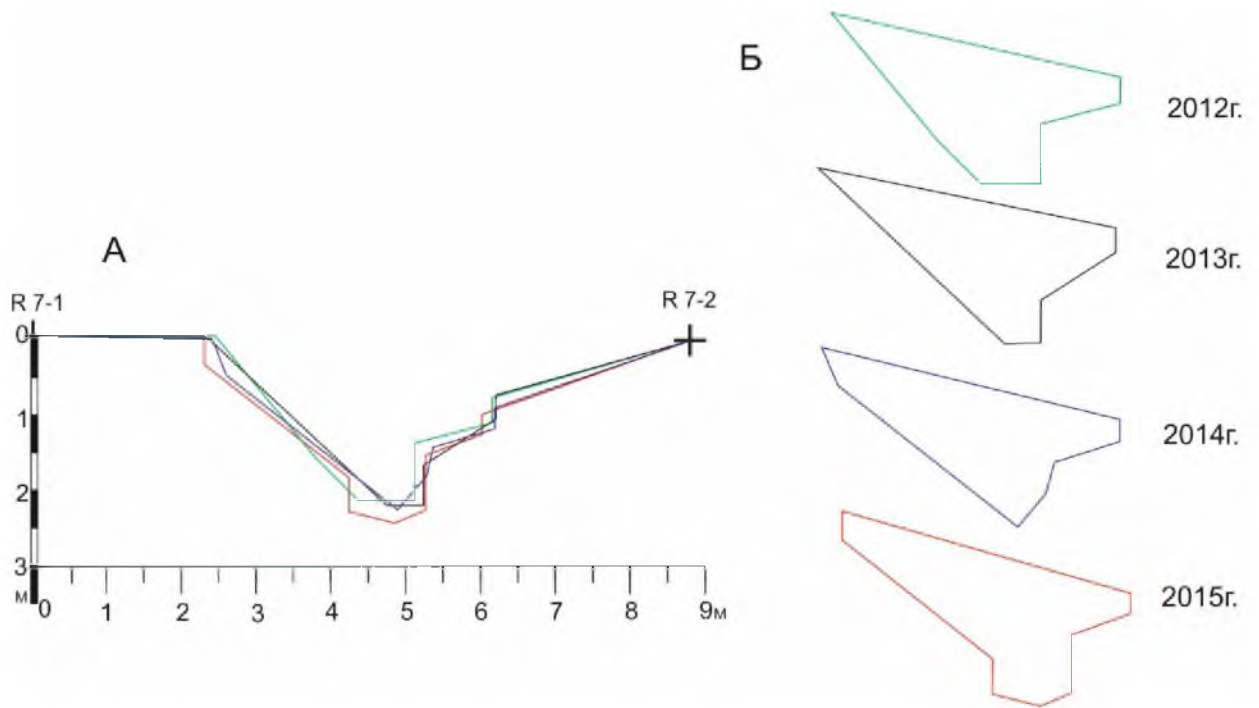


Рисунок 5.10. *A* – разновременные поперечные профили эрозионной формы; *B* – изменение контуров и площадей створа эрозионной формы на участке Mng PR-7 за период 2012–2015 гг.

– за период 2016–2017 гг. отмечена относительная стабилизация роста параметров оврагов в большинстве форм. На большинстве участков отсутствовал прирост в развитии как боковой, так и линейной эрозии. Эрозионные формы сохранили прежние параметры. В единичных эрозионных оврагах отмечено незначительное углубление русел, и, параллельно с этим, в отдельных формах встречено накопление незначительных объемов делювиально-пролювиальных масс в днищах оврагов (рис. 5.11).



Рисунок 5.11. Углубление дна оврага, обследование 2017 г.

Овражная эрозия отмечена на всех склоновых участках с уклонами от 6° и более с разной степенью активности процесса за период инструментальных наблюдений. Это подтверждает зависимость, которая показывает, что уклон до 20° увеличивает динамику эрозии пропорционально углу уклона [Хортон, 1948]. В горных частях склона с уклонами выше 70° происходит гравитационный снос материала и пополнение водных потоков твердым стоком. Выявленные зависимости увеличения динамики роста оврагов (боковая и донная эрозии) на склоновых участках, относящихся к водосборам большей площади и имеющих большую глубину эрозионного расчленения, носят эмпирический, основанный на мониторинговых данных, характер. Для верификации выявленных за период наблюдений закономерностей развития эрозионного процесса, зависимости ее динамики от параметров водосборного бассейна необходимо наращивать ряды данных натурных наблюдений, повышая инструментальную достоверность исходных данных.

5.3. Анализ компонентов геологической среды, определяющих экзогеодинамическую обстановку, районирование территории

Различные виды использования земель, разные виды нагрузки на геологическую среду, плотная капитальная застройка городской территории, перепланировка поверхности – все это элементы техногенной составляющей природно-технической системы – городской агломерации. Однако природные условия и факторы во многом определяют современную экзогеодинамическую обстановку природно-технической системы, формируя предрасположенность территории к развитию определенных экзогенных геологических процессов, а в сочетании с особенностями природно-климатических факторов могут формировать катастрофические (быстро текущие) экзогенные геологические процессы. Формирование и проявление катастрофических процессов в пределах освоенных территорий приводят к развитию чрезвычайных ситуаций в городе, повышая социально-экономическое напряжение в обществе, снижая комфортность проживания населения на данной территории, а также демонстрируют эволюционные преобразования геологической среды в целом, изменяя ее текущие параметры.

В пределах современного города Улан-Батора и примыкающих городов (Дархан, Налейх, Сайн-Шанд), поселков и поселений прослеживается следующая тенденция в застройке территории – центры поселений имеют определенную схему расположения построек, утвержденную генеральным планом развития городской территории с закрепленными улицами и скверами, обоснованием местоположения, а периферия застраивается спонтанно, неконтролируемо. Миграция населения страны в крупные города продолжается. Продолжается и освоение горных и предгорных районов Улан-Баторской агломерации.

На предыдущих этапах застройки территории – начальном, становления и советском этапе – большее внимание было уделено эндогенной составляющей и развитию катастрофических сейсмических событий. Оценка экзогенных катастрофических процессов для территории городской агломерации не выполнялась. В связи с ростом городской территории и необходимостью безопасного градостроительного планирования, работы по оценке развития катастрофических процессов в пределах городской агломерации стали особенно актуальными. Отдельные городские территории располагаются на унаследованных крупных конусах выноса, что свидетельствует об активности процессов, связанных с формированием временных водных потоков и выносом твердой составляющей временными водными потоками (рис. 5.12).



Рисунок 5.12. Выраженные в рельефе конусы выноса водосборных бассейнов.

Геолого-литологические особенности склоновых отложений

Согласно схематической карты типизации геологической среды города Улан-Батор (М 1:25 000) [Рященко, 2011; Рященко, 2017], в пределах городской территории грунтовые массивы определенных геоморфологических элементов сложены докайнозойскими и кайнозойскими отложениями разной мощности. На склонах и водоразделах рыхлые кайнозойские отложения имеют мощность до 15 м (делювиальные и элювиальные отложения); в пределах предгорных шлейфов и распадков, конусов выноса мощности могут достигать 30 м (делювиально-пролювиальные отложения); высокие пойменные и надпойменные участки р. Туул и ее притоков имеют мощность кайнозойских отложений 30–50 м, достигая в центральной части Улан-Баторской впадины 100–120 м (аллювиального, озерного и делювиально-пролювиального генезиса); в северной части города на платообразной возвышенности мощность отложений достигает 100–120 м (озерно-аллювиально-пролювиального генезиса).

Кайнозойские отложения слагающие водоразделы и склоны где расположены участки наблюдений за развитием эрозионных процессов представлены в основном крупнообломочным материалом осадочных метаморфических (делювиально-пролювиальных) и скальных (элювий) пород, в верхней части разреза которых залегают связные облессованные пески и лессовидные супеси [Рященко, 2011], при воздействии значительных временных водных потоков могут быть вовлечены в движение водной массы. В пределах элементарных водосборов, где проводились стационарные наблюдения, эрозионные формы развиты в отложениях, где преобладают

крупнообломочные дресвяные грунты с супесчаным и суглинистым заполнителем (18,0–44,3 %) или супеси и суглинки дресвяные (содержание дресвы 10–11 %) [Мазаева и др., 2012]. Характерной особенностью грунтов в разрезе является преобладание крупнопылеватого элементарного и смешанного типа микроструктуры. Заполнитель крупнообломочных грунтов нескольких расчисток (обр. 2 и 3, участок «Гульжин») характеризуется высокими значениями седиментационного объема ($V=3,7-4,1 \text{ см}^3$), относится к пльвунам со структурными связями пылевато-коллоидной группы, т.е. является неустойчивым (склонным) к пльвунным деформациям. Кроме того, в разрезе на участке исследований присутствует прослой лессовидной пылеватой тяжелой супеси (обр. 4, глуб. 1,8 м), для которой характерно слабое хлоридно-сульфатное засоление, снижающее водоустойчивость структуры грунта. Для этого образца на пастах (плотность пасты $2,21 \text{ г/см}^3$) выявлена высокая усадка ($V_y=12,8 \%$), что также отражается на способности формировать трещины усадки. Трещиноватость горных пород является причиной нарушения целостности грунтового массива и формирования эрозионных врезов.

Грунты с агрегированной микроструктурой характеризуются повышенными значениями емкости катионного обмена (обр. 6а и обр. 8, участок Хустай). Прослой суглинка (обр. 8, гл. 2 м) имеет высокую пластичность ($J=17,7 \%$), а также проявляет слабое набухание (относительное набухание $E_{sw}=3,3 \%$). Повышенная пластичность характерна также и для нижележащего слоя тяжелой супеси ($J=8,5 \%$). Заполнитель крупнообломочных грунтов суглинков (обр. 8) характеризуется высокими значениями седиментационного объема ($V=3,4-4,5 \text{ см}^3$) и относится к пльвунам со структурными связями пылевато-коллоидной группы, т.е. в средней степени является неустойчивым (склонным) к пльвунным деформациям. Образец № 7 (гл. 2.12 м) тяжелой супеси со средне- и крупнопесчаным типом структурной модели относится к пльвунам без структурных связей ($V=3,1 \text{ см}^3$).

На участке Эмээлт грунты разреза относятся к пльвунам со структурными связями пылевато-коллоидной группы, т.е. в средней степени являются неустойчивыми (склонными) к пльвунным деформациям. Среди структурных особенностей грунтов разреза были выявлены значительные величины содержания карбонатов ($S_{кр}=14,76-16,75 \%$), гумуса ($C_{орг.}=0,7-0,9 \%$). Для тяжелой пылеватой супеси (обр. 11, гл. 1,64 м) выявлена высокая пластичность ($J=10,1 \%$); средняя емкость катионного обмена $41,92 \text{ мг-экв. на } 100 \text{ г вещества}$, что говорит о значительной физико-химической активности грунта, т.е. способности вступать в обменные реакции.

Грунтовые толщи предрасположены к эрозионному размыву и деформациям и

характеризуются: набухаемостью, плавунностью, вовлечением в водный поток, перемещению грязекаменного (размытого) материала.

Таким образом, в зависимости от особенностей геолого-геоморфологических условий водосборных бассейнов деятельность временных водных потоков способна приводить к формированию катастрофических экзогенных геологических процессов – паводкам, затоплению и селевым потокам. При инженерно-геологической оценке катастрофических процессов, вызванных ливневыми стоками, целесообразно рассматривать водосборные (синоним – селевые водосборы) бассейны как единую структуру, поскольку зарождение процесса происходит в верховьях сложного бассейна, а транспортировка и разгрузка – в средней и нижней части склона. Селевой водосбор – краткое наименование бассейна, содержащего стокообразующие поверхности, способные сформировать наносоводный селевой поток [Виноградов, Виноградова, 2014].

Морфологическая характеристика водосборных бассейнов

Особенности морфологии водосборных бассейнов оказывают большое, зачастую определяющее влияние на формирование и развитие катастрофических процессов связанных с действием временных водотоков, паводков. Ливневые паводки и наносоводные селевые потоки – генетически связанные процессы. Каждый паводок, если он по своим размерам превосходит определенную границу, связанную с размывающей силой, способен привести в движение обломочный материал, слагающий русловое ложе, и становится селевым. Транспортирование влекомых наносов – это движение обломочной породы за счет энергетических затрат потока воды, поступающей в русло с окружающих склонов.

Городская территория Улан-Батора охватывает водосборные бассейны разных порядков, примыкающие с правого и левого борта к межгорной впадине – долине реки Туул. Для всех водосборных бассейнов, включенных в городскую территорию, река Туул является местным базисом эрозии, ее пойменные отложения во многих участках перекрыты конусами выноса делювиальных отложений. Морфометрические характеристики водосборных бассейнов позволяют с точностью и объективностью охарактеризовать рельеф земной поверхности и оценить его предрасположенность к развитию катастрофических процессов.

Для анализа природной предрасположенности территории к формированию катастрофических процессов, связанных с временными водотоками (дождевыми осадками), в работе использован бассейновый подход. Основателем этого метода является английский ученый Р. Хортон, который разработал систему анализа водосборных

бассейнов, включающую определение порядков водотоков [Horton, 1945]. В нашей стране бассейновый подход в своих работах применяли К.И. Геренчук [Геренчук, 1960], Г.И. Раскатов [Раскатов, 1969], Ф.Н. Мильков [Мильков, 1986], Л.М. Корытный [Корытный, 2001] и многие другие исследователи.

С использованием ГИС, цифровой модели рельефа, на топографической основе масштаба 1:100 000 было выделено 305 бассейнов. Выделенные бассейны входят в городскую территорию Улан-Баторской агломерации, устьями примыкают к долине р. Туул, охватывают территорию в 3015,15 км². По наличию дренажной сети бассейны разделены по порядковому значению (рис. 5.14). Создание и редактирование специализированных карт осуществлялось в программах MapInfo и Global Mapper. Часть данных (высотное положение объектов, углы наклонов) были получены с использованием цифровых моделей рельефа – снимков SRTM.



Рисунок 5.14. Карта-схема водосборных бассейнов Улан-Баторской агломерации.

Водосборных бассейнов первого порядка – 135 полигонов. Их площади колеблются от 0,12 до 1,80 км², в среднем это значение составляет 0,45 км², всего они занимают площадь в 61,3 км². Длина водотока в бассейне в среднем 0,9 км (максимальное значение

2,66 км, минимальное значение 0,2 км), уклон поверхности варьируется от 2 до 21°.

Водосборов второго порядка – 76 полигонов. Общая их площадь составляет 134,38 км², средняя площадь бассейна 1,72 км² (максимальное значение 23,6 км²; минимальное значение 0,2 км²). Длина водотоков от 0,6 до 27,4 км, средняя длина 3,6 км. Уклоны поверхности составляют от 4 до 19,9°.

В группу «малых» водосборов объединены водосборы первого и второго порядка, примыкающие к долине реки Туул. Средние значения площади – от 0,45 до 1,72 км². Уклоны водосборов достигают 20°. Склоны сложены гранит-порфиритами, сланцами, песчаниками, алевролитами, выветрелыми и перекрытыми пролювиальными, делювиально-пролювиальными отложениями. Суммарная мощность рыхлых отложений в пределах водосборов (зона выветривания и перекрывающие отложения) достигает 8 м. Питание подземных вод происходит за счет дождевых осадков. К толще трещиноватых выветрелых пород приурочен водоносный комплекс палеозойских осадочных и метаморфических пород. Локально развиваются склоновые процессы.

Водосборных бассейнов третьего порядка насчитывается 47 полигонов, которые занимают площадь 324,52 км². Площади водосборов изменяются от 1,1 до 30,1 км², среднее значение – 6,66 км². Длина водотоков варьируется в пределах от 3,42 до 49,0 км. Уклоны – в среднем от 2,5 до 16,2°.

Водосборов четвертого порядка – 11 полигонов. Они сконцентрированы в северо-западной и юго-восточной части городской территории. Общая площадь бассейнов составляет 315,8 км², максимальная площадь – 64,09 км², минимальная – 16,0 км², среднее значение – 31,5 км². Длина водотоков варьируется от 50,1 до 143,25 км. Уклоны поверхности – в среднем 7,52° (от 3,8 до 12°).

Водосборы третьего и четвертого порядка составляют группу «средних» водосборов. Средние значения площади – от 6,66 до 31 км². Уклоны – до 12°. Склоны сложены делювиально-пролювиальными, делювиальными и элювиальными (терригенно-флишевыми) отложениями. Суммарная мощность рыхлых отложений может достигать 20 м. Питание водосбора происходит дождевыми осадками и подземными водами. В пределах локальных водосборных бассейнов проявляется разгрузка напорных подземных вод, приуроченных к тектоническим зонам. Развиваются склоновые и эрозионные процессы.

Площади водосборов пятого порядка, примыкающих к местному базису эрозии, составляют 1448,4 км², всего 9 полигонов. Средняя площадь водосборной поверхности пятого класса составляет 160,9 км², максимальная площадь – 300,0 км², минимальная – 83,4 км². Длина речной сети бассейнов – от 167,9 до 583,0 км. Уклоны – от 6,0 до 13,2°.

Водосборов шестого порядка – всего 3 полигона. Общая площадь бассейнов составляет 739,3 км², максимальная площадь – 305,3 км², минимальная 139,2 км². Длина водотоков варьируется от 701,8 до 393,1 км. Уклоны поверхности – от 4,6 до 11,9°.

Водосборы пятого и шестого порядка представляют собой крупные водосборные бассейны с постоянными водотоками. Эта группа включает реки Толгой, Сэлбэ, Улистай, Гачурт, Холийн и другие постоянные водотоки в пределах городской территории. Такие крупные бассейны принадлежат к структурно-тектоническим зонам, в пределах которых маркируются крупные разломные зоны субмеридионального направления. К долинам приурочены водоносные горизонты средне- и верхнечетвертичных отложений с валунами и песчаным заполнителем, прослой супеси и суглинка. На территории отмечается спорадическое распространение линз многолетнемерзлых грунтов, заболоченности, криогенные процессы. Склоновые отложения представлены делювиально-пролювиальными геолого-генетическими комплексами мощностью до 35 м. К зонам выветривания коренных горных пород приурочен водоносный комплекс палеозойских осадочных и метаморфических пород. В пределах бассейнов отмечено проявление эрозии и селевых потоков по притокам более мелких порядков.

Группа «малых» бассейнов включает водосборы 1, 2-го порядка, группа «средних» – 3, 4-го порядка и группа «крупных» – 5, 6-го порядка. На карте-схеме отображены порядки водотоков территории Улан-Батора (рис. 5.15).

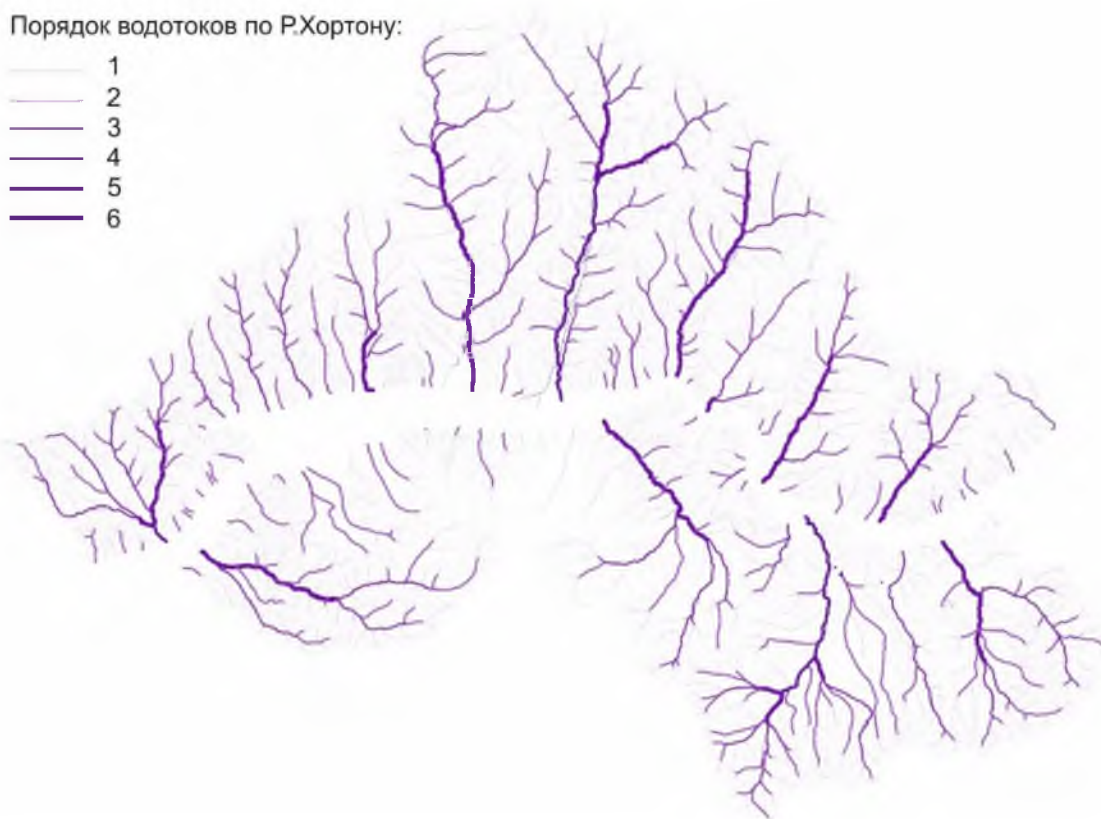


Рисунок 5.15. Карта-схема порядка водотоков Улан-Баторской агломерации.

Тематические аналитические карты морфометрических условий водосборных бассейнов Улан-Баторской агломерации

Процессы, вызванные ливневыми осадками, и их катастрофичность во многом связаны с горными условиями территории, энергией рельефа. Морфометрические показатели, полученные с топографических карт, расчетные показатели и последовательное построение специализированных тематических оценочных карт позволяют выявлять природный потенциал территории к возможности формирования катастрофических процессов, связанных с ливневыми осадками, как одним из показателей природной опасности исследуемой территории.

Показатели дренажной сети

Параметры, характеризующие дренажную сеть бассейнов: протяженность водотоков, густота речной сети, частота водных потоков в бассейне.

Густота речной сети [Horton, 1932] – это длина речной сети, приходящаяся на квадратный километр площади территории, характеризуется коэффициентом густоты речной сети в бассейне:

$$\rho = \frac{\sum L}{F} \text{ (км/км}^2\text{)},$$

где ρ – густота речной сети (км/км²); $\sum L$ – суммарная длина русловых образований в речном бассейне, км; F – площадь речного бассейна, км² [Горшков, 1979].

Густота речной сети зависит от многих факторов: структурно-геологического строения, литологии пород, растительного покрова и пр. При формировании водотоков густота речной сети водосборного бассейна отражает инфильтрационные свойства бассейна и время реакции между выпадением атмосферных осадков и формированием поверхностного стока. Она является показателем баланса между эрозионной мощностью поверхностного стока и устойчивостью почв и горных пород бассейна (рис. 5.16, А). Высокими показателями густоты речной сети обладают водосборные бассейны первого, второго, третьего и четвертого порядка.

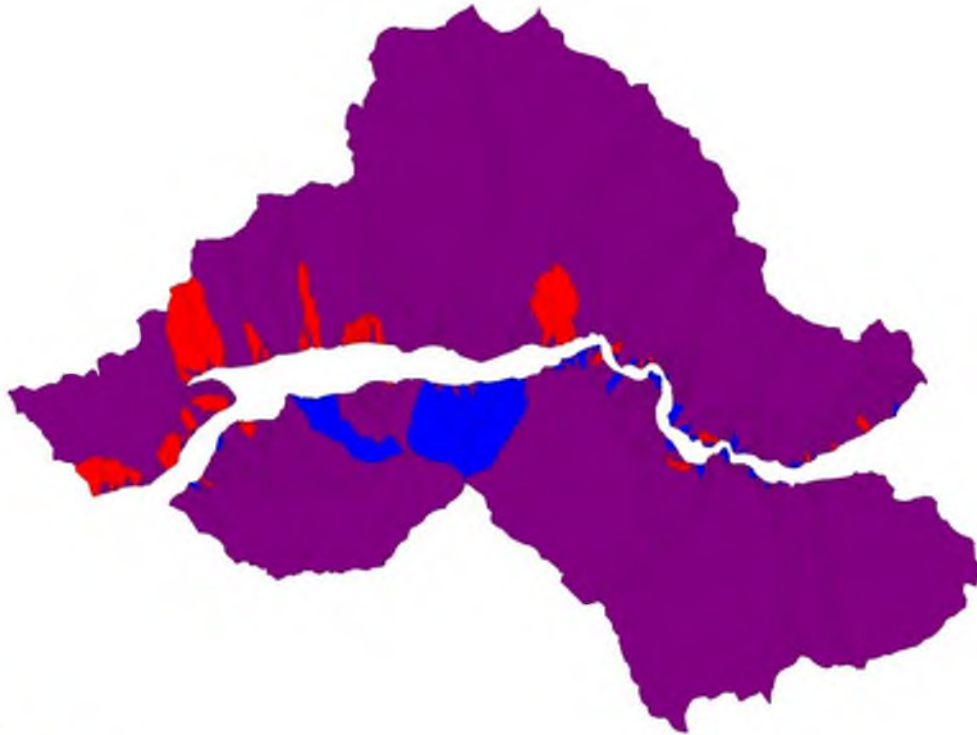
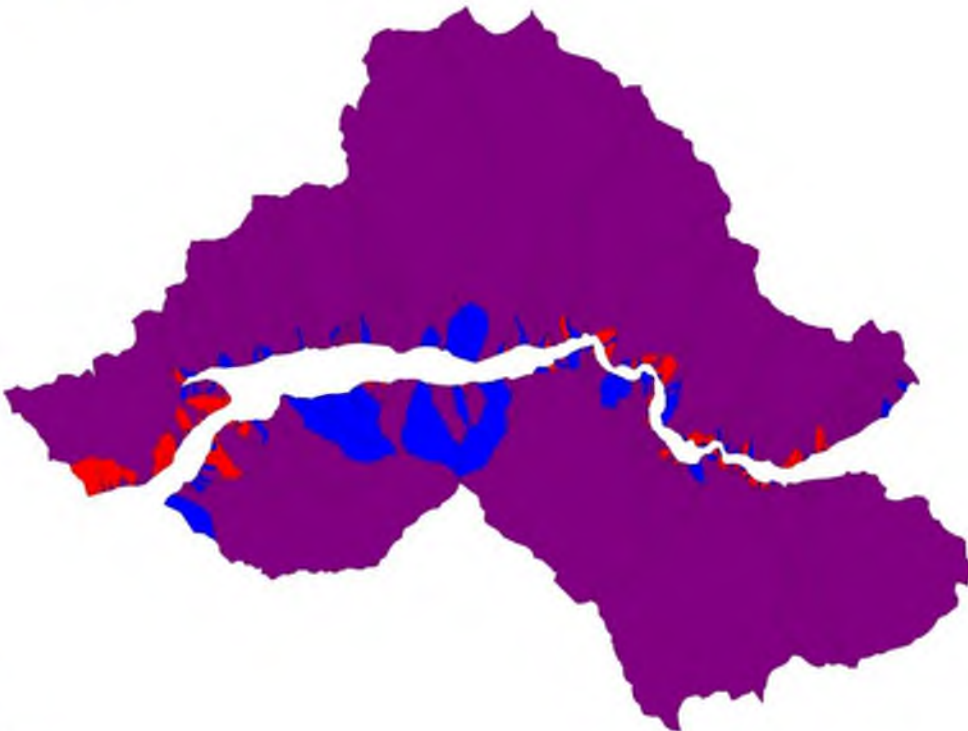
*A**B*

Рисунок 5.16. Комплект аналитических карт – показателей дренажной сети территории Улан-Баторской агломерации: *A* – густота речной сети (км/км²); *B* – частота водотоков (ед/км²).

Показатель частоты водотоков представляет собой отношение общего числа водотоков к единице площади бассейна [Horton, 1945]:

$$Fs = \frac{\sum Nu}{F},$$

где *Fs* – частота водотоков; *Nu* – число водотоков всех порядков; *F* – площадь бассейна, км².

Высокие значения показателя частоты водотока связаны с литологией подстилающих пород, растительностью, горным рельефом и с низкими инфильтрационными свойствами пород (рис. 5.16, *B*).

Высокие показатели параметров рельефа присущи водосборным бассейнам с активными эрозионными процессами, которые характерны для малых и средних водосборов. Чем выше показатель, тем интенсивнее формируется сток. Средние значения присущи для крупных водосборов с хорошо разработанной сетью, низкие – для водосборов, сложенных коренными горными породами, более устойчивыми к размывам и с малой мощностью рыхлых отложений. Важно также учитывать порядок водосборного бассейна, который и определяет степень сложности и длительности формирования условий развития сети водотоков, современное состояние активности дренажной сети.

Показатели рельефа местности

Для Улан-Баторской агломерации характерно наличие горного обрамления, поэтому высота водосборных бассейнов достигает максимально 2257 м. Данная группа включает в себя показатели, характеризующие энергию рельефа территории – глубину расчленения (превышение), коэффициент рельефа, коэффициент Мелтона.

Глубина эрозионного расчленения водосборного бассейна определяется превышением максимальной высоты над минимальной в одном бассейне. Чем больше глубина эрозионного расчленения, тем больше энергетический потенциал.

Коэффициент рельефа определяется как отношение высоты бассейна к его длине [Schumm, 1956]:

$$(Rr) Rh = H/L,$$

где *H* – высота бассейна, *L* – длина бассейна. Данный коэффициент является безразмерным и отражает общую крутизну бассейна и, как следствие, потенциал кинетической энергии водного потока. Более высокое значение коэффициента рельефа обеспечивает большую скорость и обладает большей эрозионной способностью (рис. 5.17,

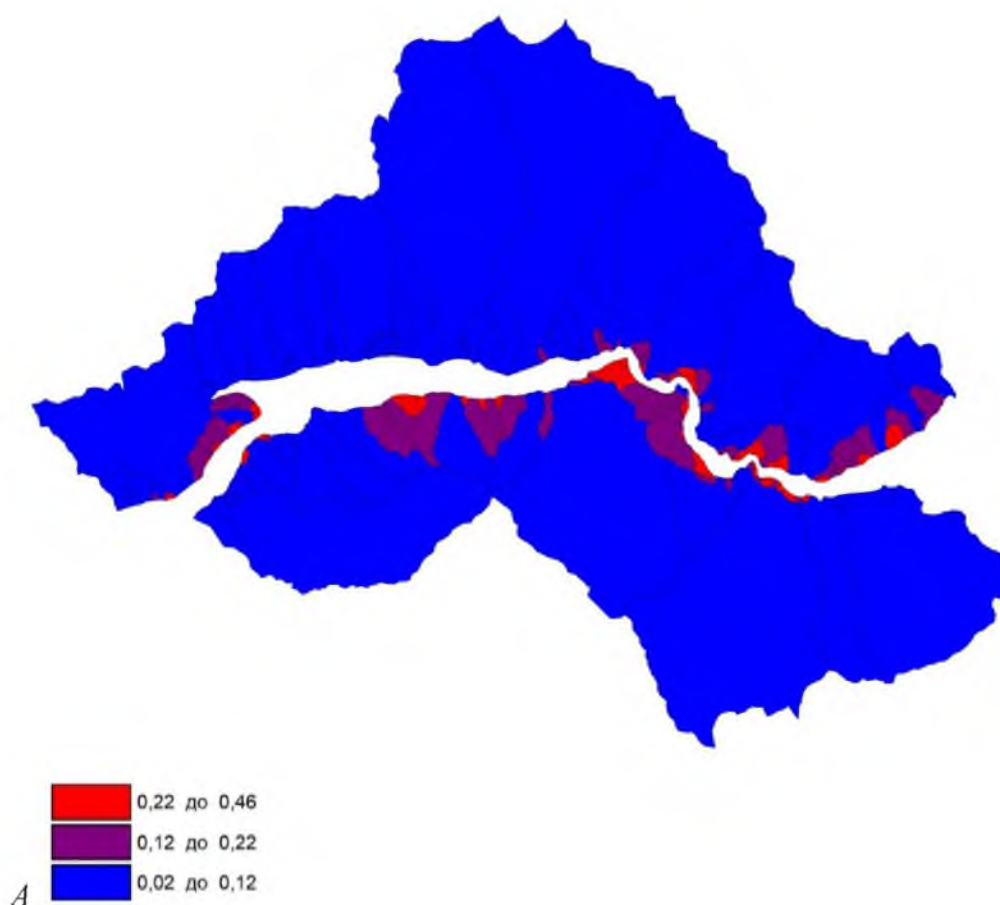
А). В бассейнах с высокими показателями коэффициента рельефа формируется активный эрозионный снос.

Коэффициент Мелтона представляет собой соотношение высоты бассейна и его площади [Melton, 1957] (рис. 5.17. Б):

$$M = H / F^{0.5},$$

где H – высота бассейна, F – площадь бассейна.

В современной литературе коэффициент Мелтона используется для отражения условий развития паводковых процессов. В работах М.А. Мелтона показано, что водосборные бассейны с коэффициентом Мелтона ниже 0,3 подвержены затоплению при паводочных ливнях, а при показателе более 0,3 возникают селевые процессы. М.Ж. Bovis и М.В. Jakob [Bovis, Jakob, 1999] в работах по территории Юго-Западной Колумбии установили, что в селевых бассейнах с коэффициентом Мелтона выше 0,53 возникают селевые потоки. В работе D. J. Wilford, J. L. Innes, M. E. Sakals водосборные бассейны, где развиваются сели, имеют коэффициент 0,6 [Wilford et al., 2004]. Ниже этого значения – водные потоки и затопления.



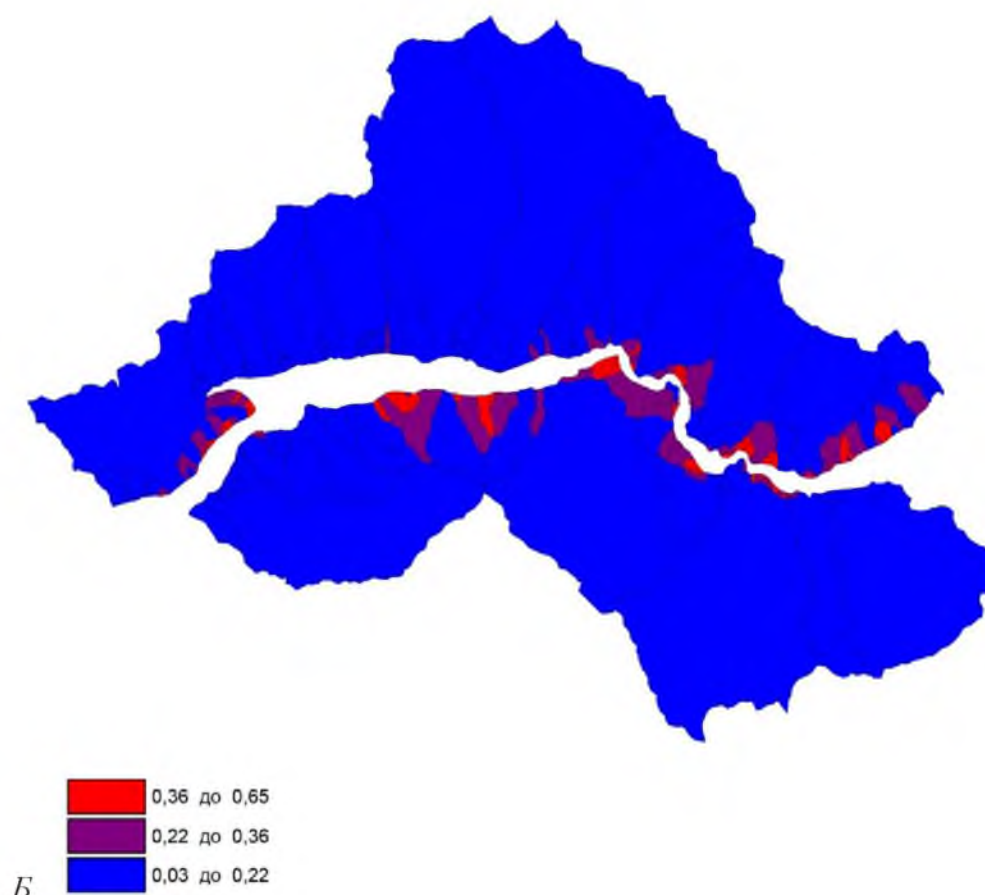


Рисунок 5.17. Комплект аналитических карт – показателей рельефа территории Улан-Баторской агломерации: *A* – коэффициент рельефа; *Б* – коэффициент Мелтона.

Для территории Улан-Батора показатели коэффициента рельефа и коэффициента Мелтона в среднем имеют невысокие значения (рис. 5.17, *A*, *Б*). Наибольшие значения характерны для коротких бассейнов первых порядков (1, 2, 3-го порядков), поскольку превышение этих водосборов более выражено. Показатели рельефа крупных бассейнов по этим двум критериям оценки не продемонстрировали энергетический потенциал бассейна в силу значительных площадей крупных водосборов. Показатель коэффициента Мелтона для исследуемой территории меняется в диапазоне от 0,02 до 0,65. На большей территории Улан-Баторской агломерации значения коэффициента Мелтона ниже 0,3, что соответствует показателям, при которых формируются паводки и происходит затопление территории при прохождении ливневых фронтов.

Показатели формы водосборных бассейнов

Показатель формы бассейна отражает геометрию бассейна в плане и особенности формирования паводочного стока во время ливневых осадков. Округлый бассейн способен формировать сток расходов воды за короткое время (время добегающего), а показатель вытянутости бассейна демонстрирует возможность добегающего паводочного стока с отсрочкой

по времени. Однако вытянутые бассейны способны формировать значительные объемы воды паводков.

Коэффициент формы водосбора характеризует отношение площади водосбора к квадрату ее длины [Горшков, 1979]:

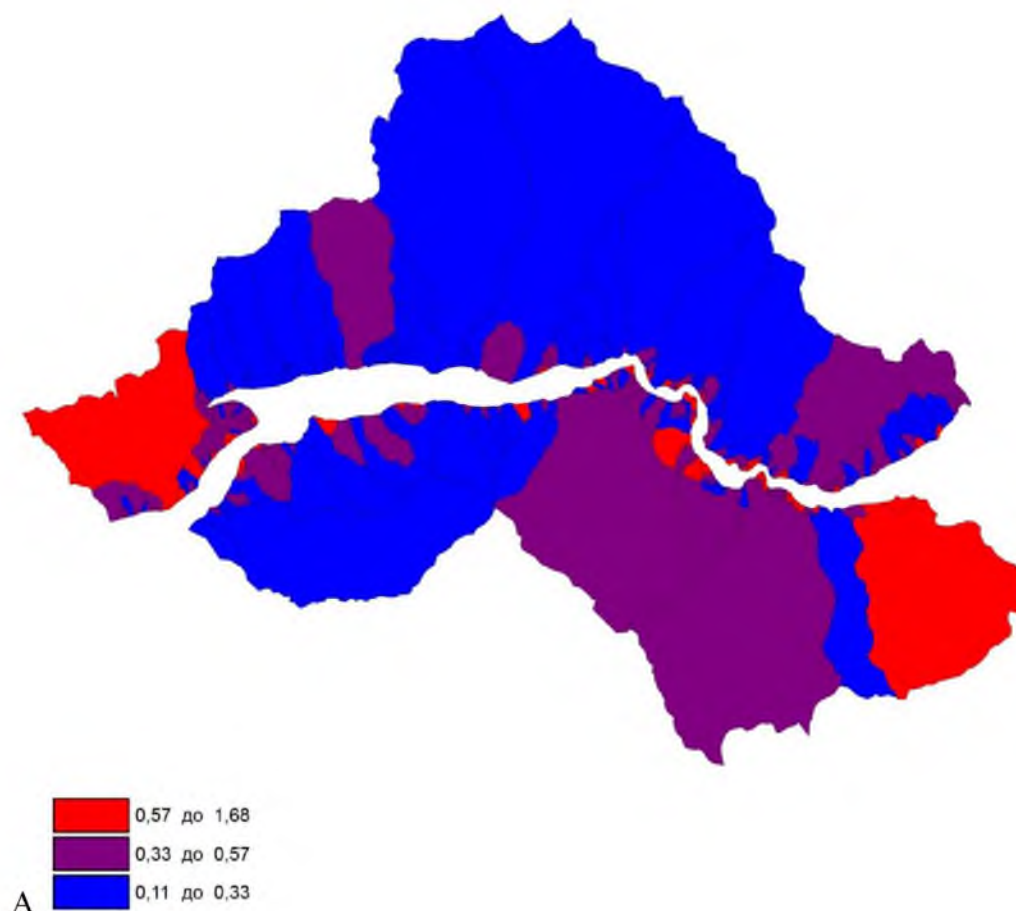
$$\delta' = \frac{F}{L^2},$$

где F – площадь бассейна, L – длина бассейна. Чем выше значение фактора формы, тем ближе его форма к кругу (рис. 5.18, А).

Коэффициент вырванности [Schumm, 1956] характеризует соотношение диаметра круга равного площади водосбора к длине водосбора:

$$Re = 2/Lb \times (A/\pi)^{0.5},$$

где Lb – длина бассейна, A – площадь водосбора. По коэффициенту вытянутости бассейны подразделяются на круглый (1,0–0,9), овальные (0,9–0,8), слабо вытянутые (0,8–0,7), вытянутые (0,7–0,5) и сильно вытянутые (<0,5). В нашей работе мы сгруппировали бассейны на круглые (1,0–0,7), вытянутые (0,7–0,5) и сильно вытянутые (<0,5) (рис. 5.18, Б).



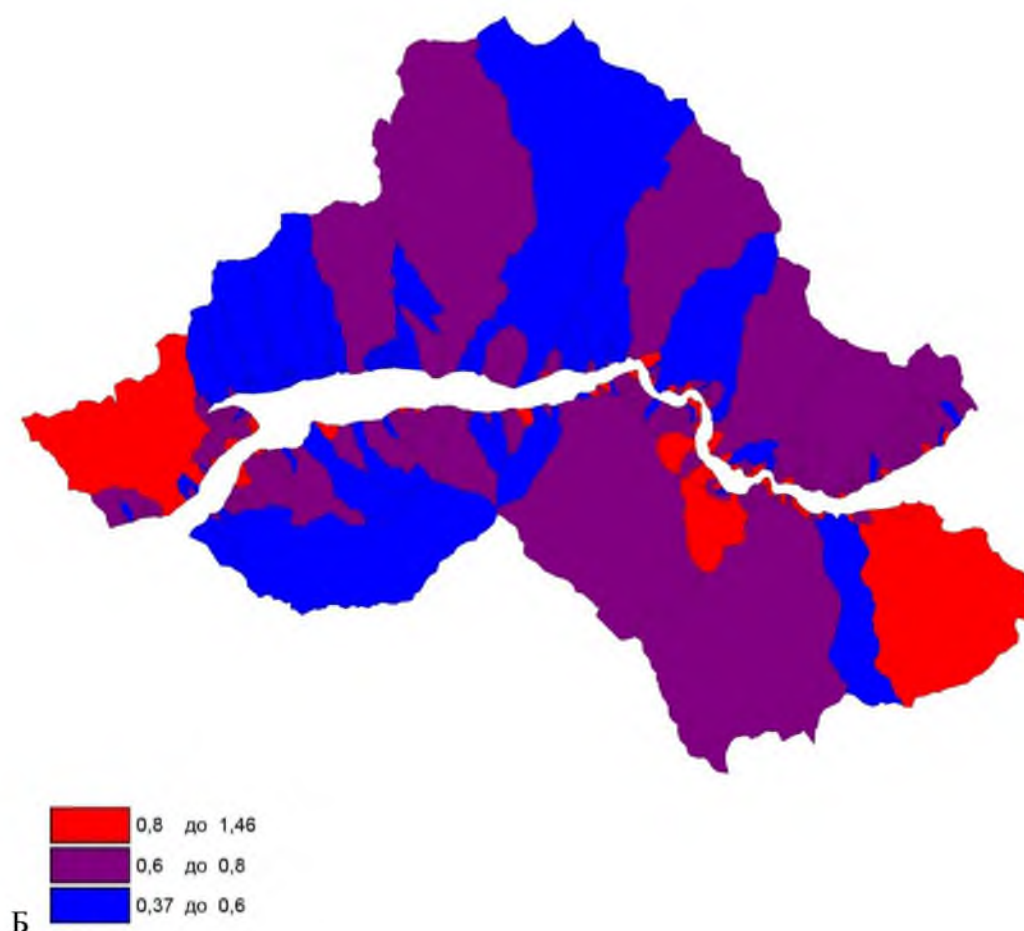


Рисунок 5.18. Комплект аналитических карт – показателей формы бассейнов на территории Улан-Баторской агломерации: *A* – коэффициент формы; *B* – коэффициент вытянутости водосбора.

Параметры форм бассейнов с учетом особенностей формирования паводкового стока имеют отражение в геометрии форм – округлой и вытянутой, поскольку данные конфигурации предопределяют крайние особенности в случаях проявления паводкового стока при ливневых осадках. Если принять за условие, что ливневые паводки могут иметь интенсивные осадки кратковременно, то в этот период сработают округлые бассейны, приведя к формированию пиковых расходов за короткое время – мгновенно. Вытянутые бассейны за это время распределяют поступившую воду и могут не привести к проявлению неблагоприятных явлений. Однако при условии, что паводковые осадки могут иметь затяжной характер, вытянутые бассейны будут накапливать воду, наращивая пиковые расходы по времени и сохраняя значительный потенциал паводковых вод, в то время как округлые бассейны с короткими долинами будут быстро отводить поступившую водную массу и не приведут к затоплению территории.

Таким образом, составлена электронная база данных морфометрических параметров водосборных бассейнов Улан-Баторской агломерации (измеренных и расчетных показателей) [Рыбченко и др., 2017]. Получены расчетные показатели морфометрических характеристик водосборных бассейнов, и построены комплекты специальных аналитических электронных карт, дающих представление о показателях характеризующих морфометрию водосборных бассейнов и определяющих современную экзогеодинамику территории Улан-Баторской агломерации. Специальные аналитические карты морфометрических показателей демонстрируют морфометрические условия территории, способствующие формированию экзогенных геологических, быстротекущих катастрофических процессов, связанных с прохождением паводочного стока в период ливневых осадков, как затяжных, так и кратковременных, над территорией Улан-Батора.

Районирование территории Улан-Баторской агломерации

Большая часть городской территории Улан-Баторской агломерации расположена в долине реки Туул и на территориях водосборных бассейнов, примыкающих к долине. Территория Улан-Баторской агломерации характеризуется определенными параметрами рельефа, дренажной сети и геометрии бассейнов. При прохождении ливневых осадков над территорией города каждый из водосборных бассейнов способен концентрировать водный поток, а его разгрузка происходит в долине реки Туул. Из разных источников имеются данные о периодически возникающих эпизодах формирования, прохождения паводков и даже схода селевых потоков в результате выпадения интенсивных осадков в разных частях городской территории; распределение осадков по площади неравномерно. По статистическим данным были установлены места прохождения разрушительных – катастрофических – водных потоков. Определено местоположение водосборных бассейнов, в пределах которых чрезвычайные события связанные с прохождением паводочного стока, были зафиксированы раньше. По данным монгольских СМИ и других источников известно, что в устьевой части реки Сэлбэ почти ежегодно отмечается подтопление территории. Катастрофические события периодически отмечались в правых притоках реки Сэлбэ, устья которых имеют разгрузку в устье долины реки Сэлбы. К зимнему периоду избыточное увлажнение участка также может сохраняться, что провоцирует развитие криогенных процессов – наледей, бугров пучения, которые вынесены исследователями на инженерно-геологические карты данной территории [Бат, 2004]. Сток поверхностных и подземных вод на участке Цаган – Хуран южного подножья возвышенности Маахуур Толгой по направлению к реке Туул затруднен в связи с положением препятствующей ему насыпи железной дороги [Сейсмичность и

районирование, 2009]. В водосборных бассейнах Тэхилтын, Толгой, Баян также были зафиксированы катастрофические паводки, ставшие причиной социального и экономического ущерба на территории города. При прохождении катастрофического процесса со значительными разрушениями и деформациями происходит быстрая смена состояния геосистемы, что демонстрирует эволюционное, но катастрофически быстрое преобразование компонентов геологической среды.

На основе полученных данных о реальных событиях на территории городской агломерации, прохождении катастрофических потоков по долинам конкретных водосборов, были проанализированы морфометрические показатели 17 водосборных бассейнов.

Выделенные водосборы с реально зафиксированным прохождением катастрофических водных потоков имеют определенные прямые и расчетные показатели водосборов (измеренные и расчетные морфометрические параметры, участвующие в морфометрической оценке). По определению [Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик, 1984], аналоговый водосборный бассейн отвечает следующим критериям:

1. Условия формирования стока однородные (морфометрические показатели), однотипность геологических, гидрогеологических и структурно-тектонических условий.
2. Площади водосборов близки и не отличаются более чем в 10 раз; средние высоты водосборов находятся в близких пределах и не различаются более чем на 300 м.

При соблюдении таких критериев водосборы можно рассматривать как аналоговые, и соответственно эти бассейны имеют схожие геоморфологические условия и могут формировать катастрофические потоки подобно тем, что были зафиксированы в эталонных водосборах.

Параметры эталонных водосборных бассейнов отражают морфологию рельефа территории, которая способствует формированию катастрофических процессов. Морфометрические показатели выделенных эталонных бассейнов приняты как диапазон значений, в пределах которого складываются условия для формирования катастрофических водных потоков. Данный диапазон значений принят как интервал показателей, при сочетании которых возможно формирование катастрофических событий связанных с ливневыми осадками в пределах оцениваемого водосбора (табл. 5.1).

Морфометрические параметры эталонных водосборных бассейнов

Параметры водосбора	Балл		
	0	1	0
Густота сети (ρ)	0-2,05	2,06-4,35	4,36-4,65
Частота водотоков (F_s)	0-0,37	0,38-1,75	1,75-4,69
Коэф. Мелтона (M)	0-0,07	0,08-0,25	0,25-0,65
Коэф. рельефа (R_r)	0-0,03	0,04-0,08	0,09-0,8
Коэф. формы (δ')	0-0,10	0,11-0,28	0,29-1,1
Коэф. вытянутости (Re)	0-0,37	0,38-0,60	0,61-1,18

Каждому отдельному морфометрическому показателю оцениваемого водосбора, значения которого попадают в указанный диапазон, присваивался один оценочный балл. Показатели, значения которых не попадают в эталонный диапазон, принимаются как показатели, не достаточные и не способствующие формированию катастрофических процессов, связанных с ливневыми осадками в локальном водосборе, и им присваивается ноль баллов. Для определения степени предрасположенности к формированию катастрофических процессов на территории Улан-Баторской агломерации выполнен статистический анализ и сравнительная оценка морфометрических параметров оцениваемого и эталонного водосбора, как частота водотоков, густота дренажа, коэффициент рельефа, коэффициент Мелтона, коэффициент формы водосбора, коэффициент вытянутости. При сочетании параметров в пределах выделенного диапазона значений в существующих природно-техногенных условиях городской агломерации на территории локально оцениваемого водосборного бассейна возможно формирование катастрофических временных водотоков при прохождении ливневого фронта. Оценка предрасположенности бассейна к формированию катастрофических процессов, вызванных интенсивными ливневыми осадками, выполнена путем комплексирования всех расчетных морфометрических показателей, суммированием присвоенных баллов. С использованием статистической обработки в ГИС-программе была произведена оценка морфометрических показателей каждого водосборного бассейна. Водосборные бассейны, набравшие максимальное количество баллов, являются потенциально опасными при прохождении интенсивных ливневых осадков. Оценка морфометрических показателей 305 водосборных бассейнов территории Улан-Баторской агломерации демонстрирует природный морфометрический потенциал (один из компонентов инженерно-геологических условий территории) к формированию катастрофических процессов паводочного характера.

На основе анализа морфометрических параметров водосборных бассейнов выполнена оценка степени предрасположенности морфометрических условий к

формированию катастрофических процессов, связанных с ливневыми осадками. Максимальная степень предрасположенности – I, характерна для водосборных бассейнов, набравших 5 или 6 баллов из трех морфометрических групп показателей. Средняя степень предрасположенности – II, складывается из участия 3–4 баллов из трех морфометрических групп. Низкая степень предрасположенности – III, соответствует водосборным бассейнам с участием только 1 или 2 баллов из 6 возможных показателей, представляющих три выделенных морфометрических группы показателей. Построена электронная аналитическая карта инженерно-геологического районирования территории Улан-Баторской агломерации по степени предрасположенности морфометрических условий к формированию катастрофических процессов ливневого генезиса (рис. 5.19), на котором в результате количественной оценки морфометрических показателей выделены районы с высокой, средней и низкой степенью предрасположенности к формированию катастрофических процессов, связанных с прохождением паводочного стока от ливневых осадков над территорией Улан-Баторской агломерации.

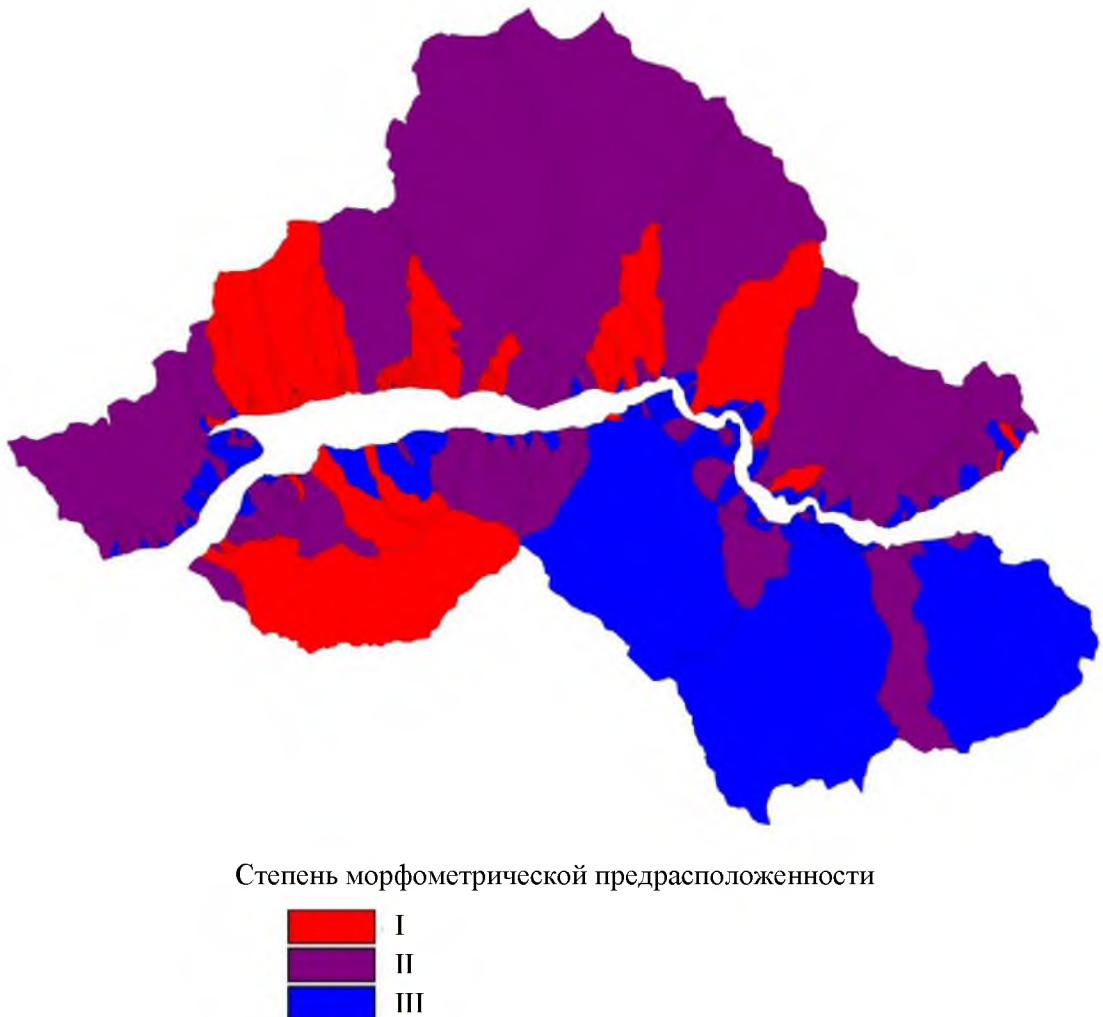


Рисунок 5.19. Карта районирования территории Улан-Баторской агломерации по предрасположенности водосборных бассейнов к формированию катастрофических процессов, связанных с ливневыми осадками.

Наибольшая степень предрасположенности к формированию катастрофических процессов паводочного генезиса характерна для коротких водосборов с большими превышениями. Западные горы способны формировать катастрофические процессы. Они имеют значительные показатели превышения, у многих водосборов Западных гор крутые склоны и короткие долины. По результатам мониторинга в пределах подобных водосборов отмечается устойчивая динамика в развитии эрозионных форм, сопровождающаяся ростом глубины и ширины оврагов и именно там могут формироваться селевые потоки при прохождении паводочного стока. Вдоль Западных гор в городе Улан-Баторе уже построены защитные каналы. В правобережной части города Улан-Батора в целях защиты городской территории от катастрофических процессов и пропуска паводковых вод построены гидротехнические сооружения на реках Сэлбэ и Толгойт. В долинах Дэнжийн мянга и Дунд и по правому и левому притокам реки Сэлбэ построены направляющие открытые каналы для защиты микрорайонов Хайласт, Чингэлтэй. В западном районе города по реке Тургэнийн и в других водосборах морфометрическая ситуация способствует формированию катастрофических процессов – паводков. Районы с высокой степенью предрасположенности занимают – площадь 583,3 км².

Районы со средней степенью предрасположенности к формированию катастрофических процессов занимают большую часть левого и центральный сегмент правого склона р. Туул – водосборы рек Толгот, Сэлбэ, Улистай, Гацууртын, Дэндийн, Овор. Эти земли осваиваются, и здесь возможны работы по планированию территории (разработка планов перспективного освоения, применение мер локальной защиты, проектирование сооружений по пропуску паводочного стока).

Следует отметить, что общая инженерно-геологическая ситуация в крупных водосборных бассейнах складывается из многих факторов, например водосборных бассейнов рек Сэлбэ, Улистай и других, нуждается в детализации условий и дополнительном изучении компонентов геологической среды. Поскольку в водосборных бассейнах более высоких порядков опасность могут представлять более мелкие притоки, так же способные формировать собственные крупные водные потоки при прохождении ливней над локальной территорией. Средняя степень предрасположенности характерна для районов городской территории площадью 1572,08 км².

Низкая степень предрасположенности к формированию катастрофических процессов соответствует бессточным мелким бассейнам и бассейнам рек Холыйн, Налайхин, Элот в восточной части городской территории. Здесь морфометрические

условия не способствуют формированию катастрофических процессов, связанных с действием временных водных потоков. Площадь территорий с низкой степенью предрасположенности составляет 860,17 км².

Морфометрические условия территории – это один из важных компонентов геологической среды, участвующий в общей оценке инженерно-геологических условий территории жилых микрорайонов города. Карту районирования территории Улан-Баторской агломерации по степени предрасположенности к формированию катастрофических процессов, связанных с ливневыми осадками, следует рассматривать как обзорную аналитическую инженерно-геологическую карту, составленную на основе количественных морфометрических показателей рельефа. Карта демонстрирует предрасположенность морфометрии рельефа к формированию группы экзогенных геологических процессов, вызванных ливневыми осадками. В результате развития и прохождения катастрофических экзогенных процессов происходит быстрая смена состояния природно-технической геосистемы, ее эволюционное преобразование и дальнейшее развитие в трансформированных, отличных от первичных условиях. Электронная карта составлена с использованием ГИС-программ, на топографической основе масштаба 1: 100 000 и может быть дополнена уточняющей инженерно-геологической информацией. С электронной карты по запросу и сформулированным целям могут быть получены выкопировки карт более крупного масштаба, позволяющие детализировать информацию и/или дополнить ее, стать основой для составления специализированных инженерно-геологических карт локальных районов городской территории.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

Улан-Баторская агломерация включает в себя городские территории столицы Монголии – города-миллионника, земли сельскохозяйственного, промышленного назначения, городские и примыкающие сельские поселения на площади 4704 м². Земли агломерации занимают Улан-Баторскую впадину (долину р. Туул) и территории горного обрамления Хэнтейской горной страны. Горные сооружения с превышениями до 2000 м имеют структурно-тектоническое происхождение и современное денудационное развитие, что предопределяет развитие эрозионно-денудационной группы современных экзогенных геологических процессов.

Анализ климатических условий региона и количество годовых осадков по данным гидрометеорологических станций в пределах Улан-Баторской агломерации показал неравномерность распределения осадков по площади исследуемой территории, и в течение года – максимумы приходятся на весенне-летний период. При незначительном общем количестве осадков (200–300 мм/год) отмечается их высокая интенсивность – до 50–91 мм в сутки и до 227 мм в месяц. Такое распределение дождевых осадков при прохождении ливневых фронтов приводит к формированию временных водных потоков паводочного характера и проявлению катастрофических экзогенных геологических процессов. На территории Улан-Баторской агломерации по историческим и опубликованным данным зафиксирован ряд чрезвычайных ситуаций, связанных с прохождением паводков и формированием селевых потоков, нанесших значительный экономический ущерб городу – 1778, 1915, 1966, 1982, 2000, 2003, 2004, 2009, 2015, 2016 гг.

В геологическом строении территории принимают участие магматические, метаморфические палеозойско-мезозойские комплексы горных пород и слабо сцементированные осадочные отложения кайнозоя. Отложения верхней части грунтового разреза деллювиально-пролювиального и элювиального генезиса обладают пластичностью, набухаемостью, плавунностью и при сочетании геолого-геоморфологических условий и значительного количества временных водных потоков могут быть вовлечены в движение, сформировать катастрофические селевые потоки.

Последствия прохождения временных водных потоков, эрозионные формы встречаются на территории города повсеместно, каждый элементарный водосборный бассейн имеет активное эрозионное русло, следы периодической активизации эрозии. Мониторинговые работы показали неослабевающую динамику эрозионного процесса. Одновременное увеличение параметров ширины и глубины эрозионных форм на ключевых участках, характерно для водосборов с большими показателями превышения

глубины расчленения и площади водосбора. На отдельных эрозионных формах зафиксирована величина бокового приращения до 0,46 м и уменьшение глубины оврагов. Величина линейного приращения оврагов составила максимально 1 м в год, не превысив эту цифру за весь период наблюдений (5 лет). Средний рост зафиксированных эрозионных форм в пределах Улан-Баторской агломерации составил 0,16 м в год.

Особенности морфологии водосборных бассейнов оказывают большое значение на формирование современной экзогеодинамической обстановки территории и развитие экзогенных катастрофических процессов, вызванных временными водными потоками. Морфометрические условия территории характеризуются особенностями распределения дренажной сети, рельефа и формы водосборных бассейнов. По 305 водосборным бассейнам территории Улан-Баторской агломерации для каждой группы морфометрических факторов определены измеренные и расчетные количественные показатели, положенные в основу построения комплекта аналитических карт. Аналитические карты отражают отдельные показатели морфометрических условий: частоту водотоков, густоту дренажа, коэффициент рельефа, коэффициент Мелтона, коэффициент формы водосбора, коэффициент вытянутости и демонстрируют распределение значений данных показателей по площади Улан-Баторской агломерации. В результате построения аналитических карт, обобщения информации об имевших место катастрофических процессах выполнено районирование территории Улан-Баторской агломерации по степени морфометрической предрасположенности к формированию катастрофических процессов, связанных с ливневыми осадками.

Районы с наибольшей степенью предрасположенности к формированию катастрофических процессов расположены по правому склону р. Туул и в западной части города по левому склону р. Тургэнийн, занимая 19,3 % от общей территории. Районы со средней степенью предрасположенности занимают большую часть левого и центральную часть правого склона р. Туул – 52,1 % от общей территории агломерации. Районы, где отмечена низкая степень предрасположенности, где отсутствуют морфометрические условия, способствующие развитию катастрофических экзогенных процессов, связанных с паводочным стоком, соответствуют мелким бессточным бассейнам и бассейнам рек Холыйн, Налайхин, Элот в восточной части городской территории, занимая 28,5 % от общей оцениваемой площади городской агломерации.

Глава 6. Экзегеодинамическая безопасность геологической среды

Территории Монголо-Сибирского региона – это динамично развивающиеся в социально-экономическом и хозяйственном отношении области, где созданы и эксплуатируются крупные природно-технические системы.

Техногенные преобразования геологической среды неотделимы от исторических этапов освоения территории и строительства технических объектов. При освоении пространств Сибири и Монголии в первую очередь заселялись южные районы, а также территории, тяготевшие к речным системам, как более доступные и удобные для проживания. Временной интервал, охватывающий период интенсивного освоения, техногенного преобразования компонентов геологической среды при строительстве и эксплуатации природно-технических геосистем, называется периодом техногенеза. Для территории Монголо-Сибирского региона этот этап не столь длительный, как для европейской части России, и начался он в конце XVII века. На начальных этапах освоения территории – возведения острогов и поселений – техногенное воздействие было минимальным и выражалось в вырубке лесов, сельскохозяйственном освоении земель, первоначальной деревянной застройке. Долгое время воздействие на геологическую среду на территории поселений (г. Иркутска – с 1661 г., г. Улан-Батор – с 1778 г.) существенно не менялось, увеличивалась лишь площадь воздействия. Одним из масштабных этапов освоения региона стало строительство постоянных транспортных систем, например Московского тракта. В марте 1733 г. издан Указ «О проведении самого длинного тракта в мире», соединившего не только европейскую часть России, но и всю Европу с Азией и Китаем. Именно это обстоятельство вызвало развитие многих городов в регионе: Нижнеудинска, Читы, Нерчинска, Иркутска [Леви, Задонина, 2006]. С ростом городов и увеличением промышленно-транспортных нагрузок к XX веку возросла доля воздействия техногенных факторов на геологическую среду, увеличились масштабы влияния.

К настоящему времени городские территории и промышленные центры, транспортные коридоры представляют собой сложные природно-технические системы, в которых на ограниченном пространстве взаимодействуют компоненты геологической среды и разнообразные технические объекты. Под техносферой понимаются системы, искусственно созданные в результате инженерной и хозяйственной деятельности человека, в виде строительных и горных работ, зданий и сооружений различного назначения [Иванов, Тржцинский, 2001]. «Техносфера – это материальный результат инженерно-хозяйственной деятельности человека на Земле, т.е. искусственные материальные объекты, строительство и функционирование которых отражается на

состоянии вмещающей геологической (природной) среде» [Голодковская, Елисеев, 1989, стр. 25].

Сейчас на территории Монголо-Сибирского региона эксплуатируются разные природно-технические системы. Здесь проходят значимые для страны транспортные магистрали, соединяющие центральную и западную часть России с восточной и северной, а также с территориями соседних государств. Эксплуатируются разветвленные железнодорожные магистрали: Восточно-Сибирская и Байкало-Амурская. В последние годы при реализации проектов по добыче углеводородов построены протяженные газонефтепроводы [Леви и др., 2006]. Совместно с железнодорожными линиями, автотрассами региона они представляют собой единую систему линейных сооружений. В относительно узких коридорах сформировалась зона влияния линейного технического объекта, ограничиваемая областью распределения напряжений от веса сооружения, степенью преобразования вмещающих горных пород, а также пространственным воздействием динамических нагрузок на геологическую среду, развитием экзогенных геологических процессов [Лапердин, 2003; Тржцинский и др., 2004]. В пределах линейных сооружений превалируют техногенные нагрузки динамического характера, на фоне статических нагрузок от полотна трасс и опор отмечается развитие и проявление экзогенных геологических процессов [Козырева и др., 2006; Козырева и др., 2007].

В Монголо-Сибирском регионе традиционно активно ведется добыча полезных ископаемых. В пределах Ангарской железорудной провинции насчитывается более 30 месторождений и рудопроявлений, что в результате разработки месторождений вызывает значительные изменения компонентов геологической среды. Зона влияния Коршуновского месторождения определяется размерами депрессионной воронки, радиус которой составил 6–7 км [Писарский и др., 1987]. В местах добычи россыпного золота как в Монголии, так и на территории Сибири отмечено перемещение значительных объемов горной породы, что приводит к нарушению значительных по площади участков. Происходит нарушение природного состояния компонентов геологической среды – техногенные преобразования русел рек, снижение уровня грунтовых вод, активизация экзогенных геологических процессов [Абалаков, Базарова, 2017].

Наиболее значимые преобразования компонентов геологической среды в регионе происходят в результате деятельности крупных горнодобывающих предприятий, где разработка сопровождается формированием крупных карьеров, отвалов вскрышных пород, прокладкой транспортных путей. Производственная деятельность при добыче полезных ископаемых в плане отрицательного воздействия на геологическую среду характеризуется, прежде всего, нарушением морфометрических параметров поверхности

земли и изменением напряженного состояния грунтов, развитием негативных экзогенных геологических процессов [Тржцинский и др., 2005]. При отработке месторождений полезных ископаемых в районах сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов проявление многих экзогенных процессов зависит от температурного режима грунтов. Изменение температурного состояния горных пород способствует активизации динамики экзогенных геологических процессов [Демьянович и др., 1993].

В результате создания каскада ангарских водохранилищ увеличилась полоса с тесной взаимосвязью поверхностных и подземных вод, что связано с обводнением интенсивно трещиноватой зоны выветривания и закарстованных пород бывшей зоны аэрации [Шенькман, 1993]. За период эксплуатационного периода водохранилищ уровень подземных вод с различной степенью запаздывания повторяет изменения уровня водохранилищ [Павлов, 1983]. Обводненность горных пород приводит к увеличению влажности, что в зоне подпора ведет к уменьшению содержания водорастворимых солей, разрушению пылеватых и формированию более крупных песчаных агрегатов в грунтах, развитию просадочности или набухаемости, общей деформации [Рященко и др., 2014]. Иногда более чем в 2,5–3,0 раза происходит уменьшение показателя уплотненности при обводнении, повышается способность к развитию пластических деформаций [Демьянович, 1976, 1993]. Ширина зоны влияния меняется в достаточно широких пределах в зависимости от особенностей залегания, распространения, фильтрационных свойств, степени анизотропности пород. Для Иркутского водохранилища ширина зоны влияния определена от 0,2–0,4 до 2–3 км. Братского – от 0,3–0,5 до 25 км, Усть-Илимского – до 4–6 км [Шенькман, 1993; Овчинников и др., 1999]. При наполнении водохранилищ ложе водоема испытывает дополнительное давление от массы воды, геологическая среда проходит адаптацию к новым условиям. В дальнейшем при эксплуатации водоема формируется динамический тип техногенной нагрузки вследствие эксплуатационных колебаний уровня воды с регулярной перестройкой всех компонентов геосистемы вслед за положением уровня, изменением состояния и свойств вмещающих горных пород при обводнении и осушении [Тржцинский и др., 2007].

Сельскохозяйственное использование земель региона затрагивает верхнюю часть геологического разреза, а главные изменения геологической среды связаны с развитием эрозионно-денудационных процессов, истощением почв и химическим загрязнением [Писарский, 1993; Рыжов, 2015]. Процессы денудации чувствительны к изменению климатических факторов и техногенным нагрузкам, что отражается в динамике экзогенного рельефообразования с конца XX столетия [Баженова, 2011]. Территории

сельских поселений по характеру воздействия имеют комбинированные виды статических и динамических техногенных нагрузок.

В Монголо-Сибирском регионе благодаря наличию уникальных природных объектов сформирован особый тип техногенной нагрузки – рекреационное использование территорий. Развитие рекреационной сферы услуг позволяет включить объекты природно-исторического наследия региона в систему экономических ценностей [Рященко С.В. и др., 2008]. Этот особый вид использования природного потенциала геологической среды применяется в последние годы достаточно широко для удовлетворения потребностей человека в отдыхе и туризме, общения с природой. В природно-технических геосистемах следует максимально сохранять в неизменном виде природные компоненты природной среды и привносить минимум техногенной нагрузки на геологическую среду.

Таким образом, на территории Монголо-Сибирского региона за 300-летний период техногенеза сложилась определенная техногенная нагрузка на геологическую среду, сформировав при этом специфические экзогеодинамические обстановки на территории региона.

6.1. Типизация природно-технических систем региона

На основе анализа видов использования природного потенциала региона, характера техногенной нагрузки на геологическую среду, результатов исследований на предыдущих этапах эксплуатации, обобщения фондовых и опубликованных материалов предшественников, собственных многолетних исследований инженерно-геологических условий экзогеодинамических обстановок на территории Монголо-Сибирского региона выделено несколько типов эксплуатируемых природно-технических систем.

В основу типизации природно-технических систем положен принцип однородности систем применительно как к геологическому пространству, так и к виду технической нагрузки, с его особенностями и режимом эксплуатации. Техногенная нагрузка при эксплуатации разных типов природно-технических систем оказывает комплексное воздействие на геологическую среду, изменяя и преобразуя ее компоненты, формируя экзогеодинамику территории.

Каждый выделенный тип природно-технической системы характеризует определенный вид техногенной нагрузки и особенности характера воздействия на геологическую среду. Под видом воздействия на геологическую среду понимается весь комплекс сознательно осуществляемых мероприятий, необходимых для строительства и эксплуатации технического объекта и/или направленных на улучшение природной среды. Для каждого выделенного типа геосистемы приведен перечень основных действующих

техногенных факторов, приводящий к трансформации состояния компонентов геологической среды, определены возможные последствия реакции геологической среды на влияние техногенных факторов и развития экзогенных геологических процессов (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Типизация ПТС Монголо-Сибирского региона*

Тип ПТС	Вид техногенной нагрузки	Действующий техногенный фактор	Реакция геологической среды, преобладающие ЭГП:
Месторождения полезных ископаемых	Разрез, карьер, шахта отвал (террикон), промышленные скважины и др.	Увеличение/снижение давления (изъятие, перемещение грунта/формирование терриконов), изменение напряженного состояния горных пород, перераспределение напряжений в массиве; изменение гидрогеологических условий	Глубокое преобразование морфометрии поверхности; Изменение поверхностного стока; Изменение режима подземных вод, формирование депрессионных воронок; Трансформация криогенных условий; Изменение физико-механических свойств грунтов; Активное развитие процессов выветривания, гравитационных процессов
Гидротехнические объекты	Водоохранилища, природные озерные котловины, используемые для накопления водной массы	Давление воды, перераспределение напряжений в горных породах зоны влияния, энергия волнения; Циклическое перераспределение напряжений в массиве, обводнение	Трансформация морфометрии поверхности; изменение гидрогеологических и геокриологических условий в зоне влияния, изменение уровня подземных вод вслед за колебанием уровня в водоеме, Трансформация криогенных условий; Трансформация физико-механических свойств грунтов; Активизация унаследованных экзогенных геологических процессов и возникновение абразионного процесса (процесса переработки берегов)
Городские агломерации	Города, поселки городского типа, рабочие поселки	Давление от веса зданий и сооружений (распределение неравномерное, как по силе, так и по глубине); Перераспределение напряжений в массиве горных пород;	Преобразование морфометрии поверхности; Трансформация гидрогеологических и геокриогенных условий; изменение физико-механических свойств грунтов; Развитие экзогенных геологических процессов и их природно-техногенных аналогов.

		Трансформация гидрогеологических и геокриологических условий территории, химическое загрязнение	
Туристическо-рекреационные объекты	Объекты Байкальской экологической зоны, Курортные комплексы; национальные парки, заповедники и другие охраняемые объекты природы	Прямое/опосредованное техногенное воздействие, площадное, локальное, точечное (неравномерное)	Трансформация морфометрии поверхности/ объекта, гидрогеологических и геокриологических условий; Активизация процессов выветривания, эолового переноса, эрозионных процессов; Локальное загрязнение почв и поверхностных вод
Сельскохозяйственные земли	Пашни, пастбища, сенокосы, лесопосадки	Прямое/опосредованное техногенное воздействие, площадное (неравномерное)	Трансформация морфометрии поверхности, гидрогеологических и геокриологических условий; Развитие денудации почв, засоления, эрозионного процесса
Линейные объекты	Автомобильные дороги, нефтепроводы, газопроводы, линии электропередачи, железные дороги	Давление от полотна трассы и от веса транспортируемых грузов (неравномерные нагрузки)	Трансформация морфометрии поверхности; Изменение гидрогеологических и геокриологических условий; трансформация состояния и свойств горных пород; Активизация развития экзогенных геологических процессов

**Составлена с использованием опубликованных материалов Б.И. Писарского, Н.И. Демьянович, В.М. Литвина, О.Н. Баженовой, Ю.Б. Трещинского, Б.М. Шенькмана, В.К. Лапердина и др.*

Каждый тип выделенных природно-технических систем включает разные по масштабу и характеру воздействия технические объекты, расположенные в пределах Монголо-Сибирского региона. Группа типа городских агломераций включает в себя разные в инженерно-геологическом плане территории городов, поселков, селений, которые располагаются как в равнинной части, так и в предгорных и горных районах. Есть городские агломерации развивающиеся на месте исторических поселений с длительным периодом застройки, есть молодые города, возведение и развитие которых укладываются в несколько десятилетий. В одну природно-техническую систему месторождений объединены территории, где ведется промышленная добыча разных полезных ископаемых. Каждая отдельная природно-техническая система уникальна и имеет свою специфику. Однако систематизация техногенных воздействий и типизация гесистем с определенным видом хозяйственного использования геологической среды позволяют применять универсальные схемы исследований. Специализированные научно-методические подходы разработаны для организации инженерно-геологических работ для каждого типа природно-технической системы: для урбанизированных территорий, для линейных транспортных систем, для гидротехнических сооружений, для месторождений полезных ископаемых [Голодковская, Елисеев, 1989; Королев, 1995; Бондарик и др., 2009; Козляков, 2018]. И эти общие методические разработки следует учитывать при проведении специализированных инженерно-геологических исследований в регионе, подбирая свои теоретические подходы для каждой природно-технической системы. В сложившихся природных и природно-технических условиях Монголо-Сибирского региона к настоящему времени ведется эксплуатация шести основных типов природно-технических систем.

В результате детального рассмотрения эволюционных преобразований геологической среды, смены экзогеодинамических обстановок при эксплуатации крупных природно-технических систем Монголо-Сибирского региона на примере выбранных ключевых объектов, представленных в работе, с разным набором и видом техногенных нагрузок видно, что к настоящему времени в регионе функционирует сеть разных природно-технических систем, организуя тем самым определенную область влияния технических объектов на геологическую среду – региональную техносферу. Региональная техносфера по интенсивности воздействия на геологическую среду, последствиям преобразования компонентов геологической среды уже может быть сопоставима с внешними средами – атмосферой и гидросферой. На локальном уровне воздействия техногенных факторов, степень преобразования компонентов геологической среды и направленность развития геосистем значительно превосходят естественные факторы воздействий. В зонах влияния природно-технических систем развитие происходит в большей степени под влиянием

техногенных факторов, активно формируя современные инженерно-геологические условия территории. На локальном уровне техносфера становится ведущей силой при формировании современных экзогеодинамических обстановок и направленности эволюционных преобразований геологической среды в целом.

6.2. Принципы экзогеодинамической безопасности геологической среды

Детальный анализ этапов развития нескольких ключевых природно-технических систем в регионе, рассмотрение эволюционных преобразований компонентов геологической среды за период техногенеза, состояние ситуационных экзогеодинамических обстановок, выявление особенностей развития экзогенных геологических процессов и их динамики показывают что, несмотря на специфику и различия природно-технических систем, при исследовании состояния геологической среды в условиях техногенеза применяется несколько единых принципов по обеспечению экзогеодинамической безопасности геологического пространства. Накопившийся опыт эксплуатации природно-технических систем подсказывает, что на этапе современного развития общества акцент должен быть сделан на рациональном и безопасном использовании геологических ресурсов региона, что усилия следует направлять на предотвращение развития катастрофических экзогенных геологических процессов. Сейчас все более очевидно, что устойчивое состояние природно-технических систем определяется балансом между техногенными нагрузками, допустимым их объемом, интенсивностью и учетом исходного состояния компонентов геологической среды, поддержание их в диапазоне показателей, в котором не происходит потери естественных функций природной среды. При эксплуатации геосистем, строительстве новых природно-технических объектов важно придерживаться экологической направленности при освоении или дальнейшем использовании геологического пространства. Чтобы не формировать условия, при которых возможно развитие неблагоприятных экзогенных процессов, следует управлять геосистемой и не допускать возникновения чрезвычайных ситуаций.

В современных экономических условиях рынка строительно-изыскательских услуг проведение многих инженерно-геологических работ строго регламентировано нормативными документами, сводами правил, строительными нормами и контролируется государственными органами. В условиях жесткого регламента требуемые к исполнению работы часто выполняются формально по существующим схемам, для прохождения контроля, без анализа всей полноты инженерно-геологических особенностей исследуемой территории. В сложившейся практике инженерно-геологических изысканий в регионе утрачены институты хранения фактического материала, разорвана преемственность

проведения исследовательских работ и хранения фондов производственных предприятий. Такое положение, в совокупности с недостатком специалистов в области инженерной геологии на предприятиях, приводит к недостаточной проработанности вопросов экологической безопасности геологической среды и сохранения геодинамических экологических функций литосферы в целом. Учитывая разнообразие и масштабы техногенной нагрузки на геологическую среду в регионе, опираясь на опыт инженерно-геологических изысканий при изучении состояния разнообразных геосистем в регионе, следует соблюдать единые принципы обеспечения экзогеодинамической безопасности геологической среды Монголо-Сибирского региона.

Предложенные принципы применимы для всех этапов хозяйственной деятельности – от предпроектного этапа исследований на вновь осваиваемых территориях до этапа длительной эксплуатации уже существующих технических объектов и не противоречат существующим законодательным актам. Соблюдение принципов экзогеодинамической безопасности геологической среды позволит более продуманно и эффективно оценить состояние геосистемы, получить комплекс количественных и качественных данных о параметрах компонентов системы, выявить современную динамику экзогенных геологических процессов, и в конечном счете разработать обоснованные и взвешенные управленческие решения по недопущению развития неблагоприятных ситуаций связанных с развитием негативных экзогенных процессов. Реализация на практике предложенных принципов экзогеодинамической безопасности геологической среды на разных этапах хозяйственной деятельности повысит информативность исходных данных при проектировании технических объектов, обоснованное и своевременное управление природно-технической системой, что обеспечит тем самым предотвращение экономических ущербов от развития катастрофических экзогенных геологических процессов.

Ниже рассмотрим принципы обеспечения экологической безопасности геологической среды при эксплуатации или проектировании природно-технических систем.

1-й принцип. Идентификация природной опасности – процедура установления принципиальной возможности и условий образования опасного/катастрофического природного или природно-техногенного процесса в пределах определенной территории, определения его площадей и частоты (скорости) проявления, генезиса, истории, закономерностей и негативных последствий [Природные опасности России, 2003].

Руководствуясь этим принципом, необходимо выполнить анализ структурно-тектонических условий, палеогеологических обстановок, пространственного положения инженерно-геологических формаций данной территории, экзогеодинамической истории

развития, амплитуд тектонических движений в прошлом и современных движений земной коры, климатических особенностей. Важно понять природную предрасположенность к развитию экзогенных опасностей, эпизоды развития катастрофических процессов в прошлом, Необходим сбор и систематизация информации о геологической среде и техногенных нагрузках.

Для понимания природной опасности при анализе текущих геологических условий природно-технической системы в целом, ее части или территории перспективного строительства отдельных технических объектов следует выполнить ряд работ:

- Сбор и изучение фондового и опубликованного материала;
- Обобщение фактического материала ранее выполненных инженерных изысканий на исследуемой территории, их анализ (частные и региональные фонды);
- Рекогносцировочное обследование, описание точек наблюдений, маршрутные исследования;
- Выявление особенностей техногенной нагрузки на геологическую среду;
- Оценка геологических условий, ретроспективный взгляд на экзогеодинамические обстановки;
- Выработка рекомендаций и корректировка дальнейших исследований.

Идентификация природной опасности связана в первую очередь с тем, что предпосылки для развития многих современных экзогенных геологических процессов закладывались историей геологии, структурно-геологическими особенностями развития территории, геоморфологией, формируя экзогеодинамические обстановки прошлого.

Многие городские территории, агломерации в регионе имеют достаточно долгую историю трансформации геологической среды под влиянием нарастающих техногенных нагрузок. Территория города Иркутска, одного из крупных исторических центров Сибири, составляет около 300 км². На современном этапе эксплуатации на городской территории широкое проявление имеют экзогенные геологические процессы: подтопление, суффозионно-просадочные явления и эрозия. В большей степени активное развитие перечисленных процессов связано с влиянием техногенных факторов: обходной фильтрацией из Иркутского водохранилища в правобережной части города, утечками из водопроводных и канализационных сетей, сбоем в работе ливневой канализации. Техногенные факторы, наложенные на природные условия территории, сформировали именно такой набор современных экзогенных процессов в черте города. В то же время техногенез не только активизирует предрасположенные к развитию процессы, но и формирует условия для развития новых, не свойственных ранее для данной территории.

Процессы абразии и подтопления на территории города Иркутска имеют строго техногенный характер [Кадетова, 2005; Рыбченко, 2009].

Многие города и поселки, зоны отдыха, курорты региона расположены в предгорных и горных районах. Современный город Слюдянка занимает территорию конусов выноса селеактивных рек Слюдянки, Похабихи, пади Улунтуй, Сухого Ручья и подвержен периодическому прохождению селевых потоков [Лапердин и др., 2016]. Территория юго-восточного побережья оз. Байкал, предгорья Хамар-Дабана предрасположена к развитию селевых процессов, обладает высоким потенциалом природной опасности. Главными факторами формирования катастрофических селевых процессов в регионе являются – энергия рельефа, наличие рыхлого материала и климатические особенности. Сели и водные паводки на территории Восточной Сибири отмечались в 1910, 1915, 1921, 1927, 1932, 1934, 1938, 1952, 1959, 1960, 1962, 1965 и 1971 гг. [Тржцинский и др., 1969]. Последнее катастрофическое событие произошло после почти 40 летнего затишья в районе курортного поселка Аршан, где по семи падам Тункинских гольцов одновременно сошли селевые потоки различной мощности. Скорости селевых потоков составляли: от 2,61 до 19,06 м/с; диапазоны пикового расхода от 46,92 до 13177,58 м³/с [Kadetova et al., 2016]. По данным Главного управления МЧС России по Республике Бурятия в результате схода селевых потоков погиб 1 человек, несколько человек получили травмы. Из-за нарушений плана застройки поселка 112 частных домов были повреждены, из них 15 полностью или частично разрушены. Мост через реку Кынгарга с низким пролетом был снесен полностью, размыты дороги. Соблюдение принципов экологической безопасности геологической среды при территориальном планировании предгорных районов поможет избежать катастроф подобного рода.

В настоящее время в регионе идет масштабное освоение северных районов, богатых месторождениями полезных ископаемых. Прокладываются линейные сооружения, строятся промышленно-перерабатывающие центры, заводы и фабрики. При выполнении инженерно-геологических изысканий северных территорий вскрываются карстовые полости, провалы (по фондовым материалам ООО Ингео, 2019). Развитие карстового процесса в северных районах Монголо-Сибирского региона обусловлено распространением сульфатно-карбонатных пород и общей историей геологического развития территории Сибирской платформы. Наличие современных карстово-суффозионно-коррозионных форм в песчаниках усть-кутской свиты ордовика связано с редкой разновидностью древнего карбонатного карста. При научном сопровождении проекта в результате обобщения опубликованных данных по району исследований, систематизации и анализа большого фактического материала изысканий производственных предприятий было выявлено, что образование

полостей вызвано выщелачивающим воздействием хлоридно-натриевых соленых вод и рассолов в прежние эпохи (в лагунных условиях мелководья) и развитием суффозионно-коррозионных процессов на последующих этапах исторического развития территории. В породах усть-кутской свиты нижнего ордовика развит древний карст, охватывающий горные породы до глубины 70–80 м и ниже базиса эрозии. Местоположение и ориентировка карстово-суффозионно-коррозионных полостей в массивах горных пород в большей степени приурочены к пересечению или простиранию тектонических элементов – разломов и зон дробления, и это обстоятельство определяет геологическую опасность данного участка.

Таким образом, при анализе инженерно-геологической ситуации территории/площадки/объекта исследований необходима вдумчивая интерпретация большого объема фактического материала более широкого научного спектра, чем предлагается регламентом выполнения строительно-изыскательских работ. Работы по идентификации природной или природно-техногенной опасности очень важны, без такого взгляда на инженерно-геологическую ситуацию, без знаний региональных особенностей развития экзогенных геологических процессов, истории формирования экзогеодинамических обстановок проектирование надежных и безопасных объектов может быть затруднено, что в перспективе приведет к геологическим катастрофам, крупным экономическим потерям и деградации природного потенциала геологической среды.

В результате реализации этапа по идентификации природной/природно-техногенной опасности нужно понять исходный природный потенциал территории и оценить существующие/планируемые техногенные нагрузки, которые способны либо усилить природные особенности, либо сформировать техногенные аналоги экзогенных процессов. Завершением этапа идентификации опасности станет оценка геологических условий, исходного состояния геологической среды и выработка рекомендаций по дальнейшему плану исследований территории и организации работ.

2-й принцип. Мониторинг геологической среды – система постоянных наблюдений, предназначенная для оценки современного состояния, построении прогноза и, в конечном счете, управления природно-технической системой [Голодковская, Елисеев 1989; Королев, 2007; Осипов, 2013].

Мониторинг (использование данных мониторинга) позволяет получить данные по динамике отдельных компонентов геологической среды: гидрогеологических, геокриологических, экзогеодинамических, составить базу данных о режиме функционирования геосистемы на современном этапе эксплуатации. Изменения состояния геологической среды в пределах природно-технических систем происходят достаточно

быстро и требуют непрерывного наблюдения за состоянием геологической среды и систематического контроля ситуации на принципах мониторинга. Мониторинг геологической среды направлен на контроль изменений параметров геологической среды, выявление современной динамики экзогенных геологических процессов и является важным научным и практическим вопросом в обеспечении безопасности объекта, сооружения, геосистемы. Безопасность – надежность, защищенность, а так же некие гарантии для объекта предотвращения каких-либо природных опасностей [Природные опасности, 2003].

Применение мониторинга геологической среды как принципа рассмотрения состояния отдельных компонентов геосистемы необходимо на современном этапе развития общества. Мониторинг позволяет отслеживать динамику выбранного набора информативных параметров, по которой будет отслеживаться и анализироваться состояние геосистемы в целом или ее наиболее существенной (уязвимой/значимой) части. Важно выбрать, обосновать и отслеживать определенные параметры, те, которые наиболее точно отражают суть происходящего в настоящее время процесса и степень его активности на современной стадии развития геологической среды при эксплуатации геосистемы. Организация системы мониторинга и выбор параметров контроля – весьма важная и актуальная задача на всех уровнях детальности исследований. Важно обоснование расстановки сети мониторинговых участков в пределах геосистемы. От положения сети, набора параметров, по которым ведутся наблюдения, зависит качество данных, объективность наблюдений, вид и объем банка данных, возможность корреляции и комплексирования с другими характеристиками, другой дополнительной информацией о состоянии оцениваемого геологического пространства.

В пределах Монголо-Сибирского региона наиболее широко развит уровень локального мониторинга. Локальный мониторинг состояния геологической среды проводится отдельными научными группами и промышленно-производственными предприятиями с помощью прямых наземных исследований с выявлением особенностей развития и динамики экзогенных процессов на проблемных/ барьерных/ ключевых участках. В состав мониторинговых работ на локальном уровне, как правило, включено визуальное обследование участков, специализированные работы с использованием комплекса инженерно-геологических, гидрологических, геологических, гидрогеологических, геокриологических, морфометрических, геодезических, геофизических и других методов исследований геологической среды. Индивидуальный подбор и комплексное применение исследовательских методов позволяют получать достаточный объем данных, необходимый для освещения текущего состояния и принятия управленческих решений в рамках регламента инженерно-геологических изысканий и производственных работ. Большинство

эксплуатирующих организаций, как пользователи недр, в соответствии со статьей 24 Закона РФ «О недрах» обеспечивают проведение комплекса геологических исследований, достаточных для нормального технологического цикла работ и прогнозирования опасных ситуаций («Положение о геологическом и маркшейдерском обеспечении промышленной безопасности и охраны недр»), включают в состав производственных работ мониторинг компонентов геологической среды на локальном и детальном уровнях. Результаты мониторинга, как правило, принадлежат частным производственным предприятиям, и доступ сторонних организаций к ним ограничен. Поскольку анализ и интерпретация баз данных – трудоемкий процесс, многие данные не получают должной обработки и теряют свою значимость. При невнимательной или недостаточной систематизации данных полученный фактический материал о состоянии геологической среды превращается в формальное выполнение задания, предписанного законодательством РФ. Зачастую малые частные предприятия, участники саморегулируемых ассоциаций строителей не способны в полной мере выполнить аналитические работы по систематизации и обобщению исходных мониторинговых данных. В таком случае привлечение научного потенциала академических центров региона способствует сохранению информации, научному обмену знаниями на основе уже проанализированной информации между отдельными участниками рынка изыскателей или производителей, а также повышает научно-практический уровень результатов этого блока регламентированных работ. При прохождении государственной экспертизы проектов научное сопровождение проектов желательно и оно значительно повышает уровень проработанности материала и обоснованности проектных решений.

В рамках научно-исследовательских работ Институтом земной коры СО РАН проводятся наблюдения за развитием современных экзогенных геологических процессов в Монголо-Сибирском регионе. Действующая специализированная сеть наблюдательных площадок позволяет получать данные по абразионно-аккумулятивным, оползневым, эоловым, эрозионным процессам, сульфатному карсту [Тржцинский, Козырева, 2007; Козырева, 2011; Рыбченко, 2012; Мазаева 2014].

Участки мониторинговой сети по наблюдению за развитием абразионно-аккумулятивного процесса расположены на берегах Иркутского и в южной части Братского водохранилища, а также в пределах южной и центральной части озера Байкал (рис. 6.1).



Рисунок 6.1. Ключевые участки мониторинговой сети береговой зоны оз.Байкал: 1 – Толстый, 2 – Гремячий, 3 – Боярский, 4 – Песчанка, 5 – Куяда, 6 – Ото-Хушун, 7 – Хейрем, 8 – Рытый, 9 – Мохайка, 10 – Торфяной берег, 14 – Святой нос, 12 – Максимиха, 13 – Катково, 14 – Гремячинск. 15 – Тогай

Локальные мониторинговые работы на ключевых участках включают в себя тахеометрическую съемку поверхности участков исследований, подводное эхолотирование, построение профилей береговых склонов в пределах закрепленных реперов, прямые измерения деформаций поверхности в результате развития экзогенного процесса, съемка элементов морфологии поверхности с применением дистанционно пилотируемых летательных аппаратов различной детальности полетов. Мобильность при использовании летательных аппаратов позволяет своевременно получать точные электронные данные, возможность обновлять их по запросу. Например, экстренно обследовать территории после какого-то масштабного события, проводить обследование труднодоступных участков, выполнить анализ ситуации во времени и пространстве. Использование летательного аппарата на разных высотах позволяет получить снимки разного масштаба, с различной детальностью, необходимой для проведения различного вида работ: от локального до детального уровня.

На территории Монголо-Сибирского региона оснащена специальным оборудованием сеть дистанционного мониторинга температурного режима грунтов южной границы

криолитозоны – территории островного и редкоостровного распространения многолетнемерзлых пород, области глубокого сезонного промерзания (рис. 6.2).

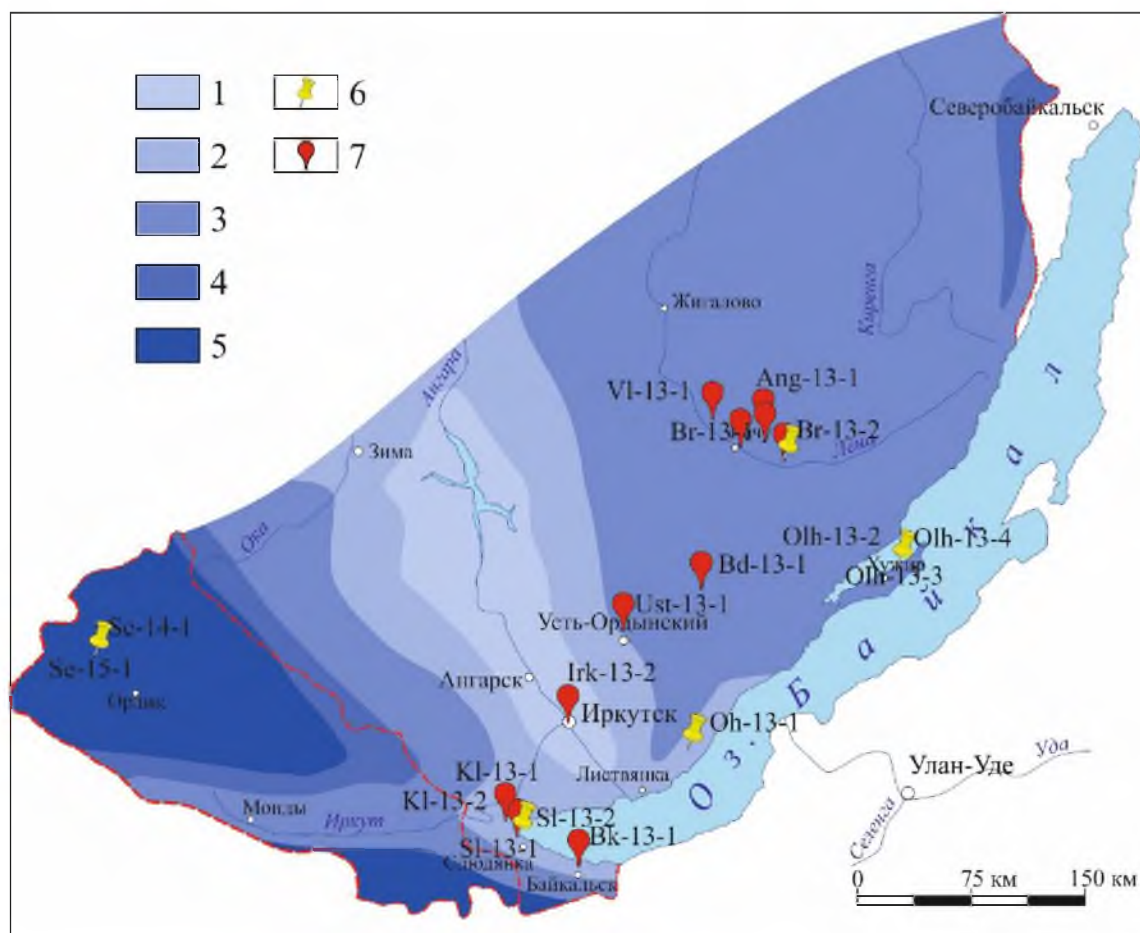


Рисунок 6.2. Расположение мониторинговых площадок на карте мерзлотного районирования. 1 – область без многолетнемерзлых грунтов; 2 – область с редкими островами многолетнемерзлых грунтов; 3 – область островного распространения многолетнемерзлых грунтов; 4 – область многолетнемерзлых грунтов с островами таликов; 5 – область сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов; 6 – скважины с термодатчиками; 7 – скважины с термокосами [Светлаков, 2018].

Мониторинговая сеть по наблюдению за температурным режимом горных пород включает 22 скважины и одну горную выработку. В скважинах установлены четырехканальные температурные датчики НОВО U12, двухканальные температурные датчики НОВО Pro V2 2 ext. Temp и одноканальные НОВО UA, термокосы. Детальный анализ условий, сопоставление и обобщение данных температурного режима грунтов на юге Восточной Сибири позволяют оценить отклик геологической среды на современные климатические и техногенные изменения в регионе [Светлаков, 2018].

В целях получения данных по динамике и особенностям развития эрозионных процессов в Монголо-Сибирском регионе на территории Монголии организована мониторинговая сеть, состоящая из 10 стационаров. Ключевые участки, где организованы стационарные наблюдения, расположены в районе склона Наран, на склоне юго-западной экспозиции горы Сонгино хайрхан уул (Налайх), на склонах гор Толгойт и Чингэлтей в водосборных бассейнах рек Сэлбэ и Толгойт, которые отражают разные геолого-геоморфологические условия территории.

Ежегодно результаты мониторинговых работ передаются в природоохранные органы Иркутской области и публикуются в ежегодных Государственных докладах «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области», «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране» и могут быть предоставлены по запросу в качестве баз данных или в другой научно-аналитической форме любой организации для дальнейшего использования в целях оценки состояния геологической среды в регионе. В настоящее время на территории Монголо-Сибирского региона разрабатывается и внедряется система дистанционного мониторинга – передача данных о динамике экзогенных геологических процессов в режиме реального времени с трансляцией информации в единый информационный центр Иркутского научного центра.

Полученные в ходе мониторинга данные по динамике региональных экзогенных процессов имеют долгосрочное применение. Высокая точность и репрезентативность рядов данных о развитии отдельных экзогенных геологических процессов в регионе используются для анализа текущей ситуации по запросам и построения разноуровневых и разновременных прогнозов. Результаты мониторинговых работ в регионе, на тех объектах, где они организованы и ведется их обработка и научное обобщение, обеспечивают информацией процесс управления природно-техническими системами. На предприятиях, на которых организован мониторинг и научно-аналитическая обработка полученной информации, осуществляется своевременное управление состоянием геосистемы, что повышает устойчивость природно-технической системы и обеспечивает безопасность работы предприятия. Принятие обоснованных управленческих решений необходимо осуществлять именно на основе постоянных наблюдений на стационарных участках мониторинговой сети и верификации с результатами региональных данных по динамике процесса.

3-принцип. Анализ эволюционных преобразований геологической среды. Применение принципа анализа эволюционных преобразований геологической среды направлено на рассмотрение большого количества полученного фактического материала, обобщения и дальнейший системный подход к оценке состояния геологической среды, с тем чтобы понять «что

было и что стало» с компонентами геологической среды природной или природно-технической системы в современных условиях.

На данном этапе следует провести построение различных картографических моделей, выполнить районирование территории, провести расчеты опасности процессов и прогнозные построения, что, в конечном счете, покажет варианты возможного развития геологической среды в условиях техногенных нагрузок.

В зависимости от поставленных задач и хозяйственных этапов следует выявить количественные показатели экзогеодинамического потенциала территории: активность и активизацию экзогенных процессов, пораженность территории ЭГП, провести расчеты опасности экзогенных геологических процессов, по возможности выполнить оценку геологического риска для хозяйственных объектов.

Обладая достаточным количеством информации по объекту исследований, руководствуясь принципом эволюции геологической среды и последовательной смены экзогеодинамических обстановок, следует выполнить следующие виды работ:

- классификацию ЭГП по группам опасности и катастрофичности, с учетом данных мониторинга;
- районирование территории по выбранным критериям;
- картографическое и математическое моделирование состояния компонентов геологической среды природной или природно-технической геосистемы;
- построение прогнозных расчетов.

В пределах зон влияния природно-технических систем в регионе по классификации экологических последствий, учитывающих прямое воздействие экзогенных геологических процессов на человека и комфортность проживания людей через оценку деформаций или разрушения инженерных объектов, на территории Монголо-Сибирского региона можно выделить группы экзогенных процессов:

1. Группа катастрофических процессов.

Катастрофический процесс – это внезапное событие, быстротекущий процесс, влекущий тяжелые последствия, разрушения и жертвы. Проявление катастрофических процессов естественны и неизбежны, как компонент эволюции геологической среды Земли [Трофимов, Зилинг, 2002].

Селевые процессы по масштабам и силе проявления в регионе отнесены к группе катастрофических. Региональные селевые потоки формируются в результате сочетания природных факторов: геолого-геоморфологических и климатических условий, прямое техногенное влияние на этот процесс слабое и в большей мере имеет очень локальное распространение. Однако катастрофичность проявления этого процесса, особенно на

освоенных территориях, очень высока. Снизить геологические риски и экономические ущербы от развития селей возможно при условии организации сети мониторинга параметров процессообразующих факторов, системы оповещения населения, внедрения образовательных программ для населения, реализации предупредительных мероприятий и применения инженерной защиты социально-хозяйственных объектов.

2. Группа опасных процессов.

Опасный процесс – любые изменения состояния породных, водных, воздушных биотических или смешанных образований природы, которые могут привести к негативным для человека, объектов хозяйства или окружающей среды (живой природы) последствиям [Природные опасности России, 2003].

Опасные процессы оказывают непосредственное воздействие на трансформацию компонентов геосистемы, опосредованно приводят к изменениям или разрушениям, вызывая потерю качества экологического ресурса геологической среды. С учетом данных по динамике экзогенных процессов в регионе в группу опасных отнесены: абразионно-аккумулятивные процессы, оползни и сульфатно-карбонатный карст. Развитие и проявление данных процессов способно приводить как к значительным потерям природного ресурса, так и к экономическим ущербам. В отдельных случаях крупные оползни и обвалы при эксплуатации природно-технических систем могут перейти в группу катастрофических процессов.

3. Группа неблагоприятных процессов.

Неблагоприятные процессы не представляют угрозы для жизни человека и животных, вызывают изменения составляющих экосистем, ухудшают условия жизнедеятельности человека, осложняют эксплуатацию инженерных сооружений [Трофимов, Зилинг, 2002].

К группе неблагоприятных экзогенных геологических процессов в регионе, не представляющих угрозы для жизни людей, но осложняющих использование технических объектов, относятся процессы: суффозия, просадки, боковая речная эрозия, заболачивание территории и криогенные процессы. Это процессы длительного действия, в большей степени они связаны с изменением показателей состояния и свойств грунтовых массивов на детальном уровне: плотности, влажности, пористости, выноса песчаного материала и др. При недоучете особенности состояния и свойств грунтового основания при строительстве и, как следствие, развитие группы неблагоприятных процессов способны приводить к значительным экономическим ущербам.

Принцип рассмотрения и учета эволюционных преобразований геологической среды природной или природно-технической системы – важный аспект современного взгляда на

анализ состояния геологического пространства в пределах Монголо-Сибирского региона. В регионе существуют геосистемы, в которых период техногенной нагрузки, ее интенсивность и степень воздействия на геологическую среду возрасали на протяжении всего техногенеза и оказывали значительные воздействия, приводя к существенным трансформациям геосистемы. Без анализа этапов эволюционных преобразований геологической среды, как природного генезиса, так и техногенного, в настоящее время невозможно уже оценить текущее состояние, понять динамику процессов, их характер, набор процессообразующих факторов и составить прогнозные представления о дальнейшем развитии геосистемы. Необходимость анализа эволюционных преобразований геологической среды природно-технических систем региона за период техногенеза стала очевидной, это актуально при проведении инженерно-геологических работ на данной территории.

Каждый из представленных принципов – это не блок работ, а взгляд на работы, которые выполняются на определенном этапе хозяйственного освоения или использования (рис. 6.3). Эти взаимодополняющие и взаимосвязанные принципы предполагают последовательное решение ряда вопросов, нацеленных на обеспечение экзогеодинамической безопасности геологической среды региона и сохранение экологической функции литосферы. Применение принципов обеспечения экологической безопасности геологической среды оправдано при соблюдении современных требований природопользования – Закона об охране окружающей среды. Предлагается более широкое применение научного сопровождения при выполнении строительно-изыскательских работ, проектов или ведении производственных работ. Выполнение научно-аналитических исследований высококвалифицированными специалистами, обладающими результатами интеллектуальной собственности (научные труды, базы данных, программное обеспечение, патенты и др.), в рамках научного сопровождения экономически оправдано, так как стоит гораздо меньше, чем устранение последствий проявления катастрофических и опасных экзогенных процессов. Научный потенциал специалистов Академии наук при научном сопровождении проектов увеличит проработанность фактического материала, продуманность и обоснованность технических решений, а также положительно повлияет на стабилизацию состояний природно-технических геосистем и безопасность их эксплуатации. Представленные принципы обеспечения экологической безопасности в конечном итоге приводят к выработке рекомендаций по предотвращению развития катастрофических геологических процессов.

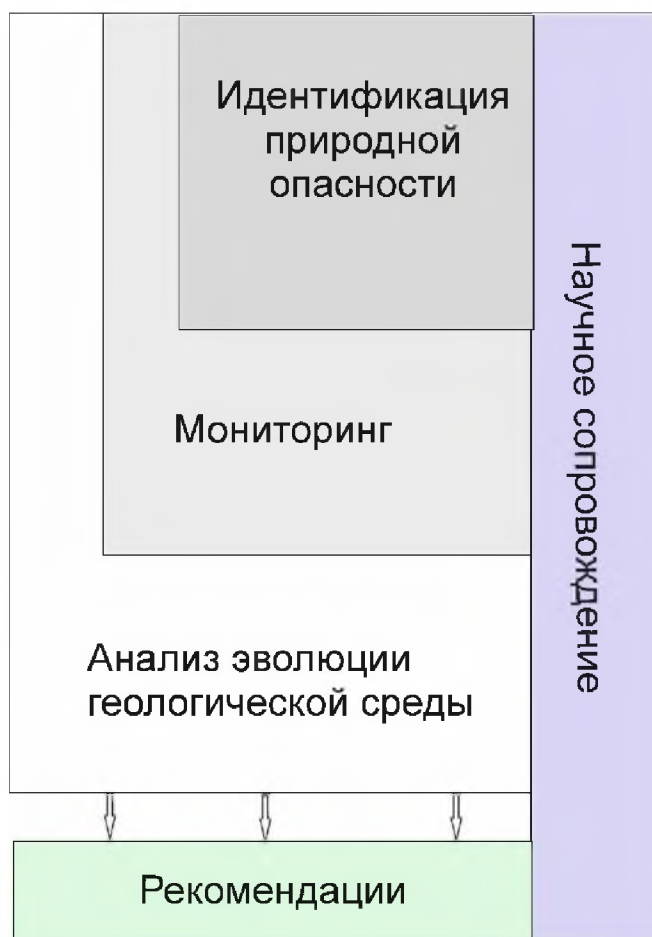


Рисунок 6.3. Принципы обеспечения экзогеодинамической безопасности геологической среды.

Представление научнообоснованных рекомендаций для эксплуатирующих организаций и предприятий информации о состоянии геологической среды в достаточном и исчерпывающем объеме, мероприятий по стабилизации состояния компонентов геологической среды позволяют подойти к управлению состоянием природно-технической системы, принимать взвешенные управленческие решения и определять стратегию дальнейшего природопользования.

Представленных принципов обеспечения экологической безопасности геологической среды Монголо-Сибирского региона следует придерживаться в целях сохранения ресурсной функции литосферы. В соответствии с Конституцией Российской Федерации каждый гражданин имеет право на благоприятную окружающую среду, а также каждый обязан сохранять природу и окружающую среду, бережно относиться к природным богатствам, которые являются основой устойчивого развития, жизни и деятельности народов, проживающих на территории Российской Федерации.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

На территории Монголо-Сибирского региона за весь период техногенеза сформировано шесть основных типов природно-технических систем, оказавших значительное влияние на эволюцию геологической среды и во многом определяющих современную экзогеодинамическую обстановку, развитие инженерно-геологических условий. Каждому типу природно-технической системы присущ свой вид техногенной нагрузки с основным выделенным техногенным фактором воздействия, выраженной определенной реакцией геологической среды на техногенное вмешательство.

Анализ сложившейся техногенной нагрузки на геологическую среду, ее систематизация и типизация геосистем позволяют применять единые подходы и универсальные схемы исследований. На основе опыта эксплуатации природно-технических систем в регионе, анализа последствий эволюции геологической среды за период техногенеза предложены принципы обеспечения экзогеодинамической безопасности геологической среды Монголо-Сибирского региона. Принципы экзогеодинамической безопасности включают в себя идентификацию природной опасности, мониторинг компонентов геосистемы или использование данных существующих стационарных наблюдений за динамикой компонентов геологической среды в регионе, анализ эволюции геологической среды. Предложенные принципы применимы на всех этапах хозяйственного освоения или использования территорий, основаны на системном подходе к анализу состояния геологической среды, развития экзогенных геологических процессов.

На основе экзогеодинамических принципов в исследовании геологической среды региона формируется новый, современный экологический взгляд на безопасное использование природных ресурсов и сохранение экологической функции литосферы. Использование научного сопровождения при реализации проектов по оценке состояния природных и природно-технических систем увеличивает обоснованность разрабатываемых рекомендаций и принятие научнообоснованных управленческих решений, что отражается на предотвращении развития катастрофических геологических процессов в регионе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная работа вносит вклад в изучение закономерностей формирования экзогеодинамических обстановок за период эксплуатации крупных природно-технических систем Монголо-Сибирского региона и служит основой развития фундаментальной региональной экзогеодинамики и инженерной геологии. Основные результаты, отражающие научную значимость исследований, сводятся к следующим.

1. Переработка береговых склонов на протяжении всего периода эксплуатации долинных водохранилищ сезонного и многолетнего регулирования сохраняет высокую степень активности. Максимальные абразионные размывы приурочены к участкам, сложенным рыхлыми суглинисто-супесчаными отложениями, облессованными суглинками и супесями четвертичного возраста различного генезиса (на Иркутском водохранилище переработка достигла 300 м, Братском – 200 м). На основе сопоставления данных предыдущих этапов эксплуатации и современных данных установлено, что за период эксплуатации природно-технической системы отмечается стабильное увеличение протяженности абразионного типа берегов по периметру водоемов.

На берегах водохранилищ выявлена активизация унаследованных оползней и возникновение свежих оползневых деформаций, развивающихся в виде сдвига по наклонной или круглоцилиндрической плоскости скольжения. В результате мониторинга на стационарных участках зоны влияния водохранилищ установлено, что динамика смещения оползневых блоков при эксплуатации водохранилища увеличилась до 1,7–3 см/год, что превышает величину смещений в естественных условиях – до создания водохранилищ (0,5–0,4 мм/год).

На юге Братского водохранилища выделены участки активного проявления сульфатного карста. Выделены его морфогенетические типы: бронированный, покрытый и открытый. Зафиксированные на дневной поверхности карстовые формы имеют коррозионно-гравитационный и карстово-эрозионный генезис. В результате мониторинговых исследований установлены периоды всплеска карстовой активности (2003, 2009 и 2011 гг.), что тесно связано с периодами понижения уровня воды в водоеме. Современная активность карстового процесса соответствует 14 новым карстовым формам за 15 лет.

2. Естественное развитие береговой зоны озера Байкал происходило на протяжении миллионов лет, протекая в особых сейсмотектонических и геологических условиях Байкальского региона со значительной амплитудой колебаний палеоуровней воды в водоеме. Длительная геологическая история естественного формирования профиля берегового склона отразилась на последующей относительно быстрой адаптации побережья к новому положению уровня воды в водоеме при его техническом регулировании.

За период эксплуатации резервуара выделено четыре этапа смены экзогеодинамической обстановки береговой зоны озера Байкал. На основе обобщения большого количества опубликованных и фондовых материалов показано, что первый этап (1959–1974 гг.) связан с наполнением, высоким положением уровня воды в озере и первым циклом технической эксплуатации водоема. Второму этапу (1974–1995 гг.) свойственна активная адаптация геологической среды к заданным эксплуатационным параметрам природно-техногенной системы. Данный этап включает период многолетнего понижения уровня в озере и период эксплуатации со значительной амплитудой колебаний воды в резервуаре. Третий этап (1995 г. – 2014 г.) характеризуется относительной стабилизацией абразионного процесса, что связано с положением уровня воды озера на низких отметках и фиксированным изменением уровня в диапазоне одного метра. За период техногенеза на участках распространения абразионного, аккумулятивного типов и подтипов берегов произошло переформирование параметров профиля береговых склонов. Аккумулятивные берега подверглись интенсивным динамическим преобразованиям и в настоящее время продолжают испытывать деструктивные процессы. Динамика абразионного процесса при прочих равных условиях контролируется уровнем режимом водоема. В результате составления и анализа Карты типов берегов озера Байкал М. 1:2 500 000 установлено, что основные типы берегов имеют протяженность: структурно-абразионные – 717,95 км; абразионные – 906,28 км; аккумулятивные – 421,78 км; техногенные – 28,16 км. Составленная электронная карта используется как один из слоев интерактивной карты озера Байкала при реализации проекта онлайн-мониторинга состояния природной среды озера.

3. Современное состояние геологической среды алмазоносного месторождения обусловлено особенностями структурно-тектонического строения территории, литолого-геологическими и физико-механическими свойствами вмещающих и перекрывающих горных пород, а также характером техногенных преобразований. Интенсивные и масштабные техногенные воздействия в результате эксплуатации карьера приводят к развитию техногенных экзогенных геологических процессов (обвалы; осыпи; эрозия; оползни). Разработка месторождения ведется в условиях криолитозоны с температурой горных пород в диапазоне от -2 до -1 °С, где высокотемпературные горные породы чувствительны к дополнительным техногенным нагрузкам и способны за короткий период перейти в талое состояние. Организация и проведение комплекса мониторинговых инженерно-геологических работ позволяют осуществлять контроль состояния геологической среды и способствуют принятию обоснованных управленческих решений.

Устойчивость конструктивных элементов бортов карьера при длительной эксплуатации алмазоносного месторождения определяется сочетанием структурно-

тектонических особенностей участка месторождения, раздробленностью массива, литологией пород в разрезе и степенью реакции природных факторов на различные виды и масштабы дополнительных воздействий (проникновение агентов выветривания, динамичность гидрологических факторов, интенсивность проявления экзогенных геологических процессов).

4. Городская агломерация создана на месте исторического центра, в области Хэнтэйской горной провинции и занимает межгорную впадину, долину крупной реки р. Туул и территории горного обрамления. Горное обрамление с превышениями до 2000 м обладает высоким потенциалом энергии рельефа и имеет активное современное денудационное развитие, что предопределяет преобладающее развитие эрозионно-денудационной группы экзогенных геологических процессов. Геолого-геоморфологические условия в сочетании с особенностями резко континентального климата территории способствуют формированию экзогенных процессов, вызванных временными водными потоками. С учетом особенностей распределения количества осадков в сезонном режиме, характера водосборов и дренажной сети проведен детальный анализ морфометрических показателей водосборных бассейнов. На основе измеренных и рассчитанных показателей, с применением статистической обработки, построены электронные аналитические карты и выполнено районирование территории города по предрасположенности водосборных бассейнов к формированию катастрофических процессов, связанных с ливневыми осадками. В пределах города выделены районы с низкой (28,5 % площади города), средней (52,1 %) и высокой степенью (19,3 %) предрасположенности.

5. На основе обобщения данных по динамике экзогенных геологических процессов крупных природно-технических систем в разные периоды эксплуатации, показано что на территории Монголо-Сибирского региона эксплуатируется шесть основных типов природно-технических систем, оказавших наиболее существенное влияние на формирование современной экзогеодинамической обстановки в регионе. Анализ опубликованных и фондовых материалов, касающихся техногенной нагрузки на геологическую среду, типизация гесистем в регионе позволяют применять единые подходы, универсальные схемы исследований и общие принципы обеспечения экзогеодинамической безопасности геологической среды включающие: идентификацию опасности; мониторинг или использование данных по динамике компонентов геологической среды; анализ эволюции геологической среды. Применение принципов экзогеодинамической безопасности формирует современный экологический взгляд на сохранение природного потенциала территории региона, экологических функций литосферы. Использование научного сопровождения при реализации проектов по оценке состояния природных и природно-

технических систем повышает обоснованность разрабатываемых проектов и способствует предотвращению развития катастрофических экзогенных геологических процессов в регионе.

6. Полученные в ходе изучения современной экзогеодинамики крупных природно-технических систем Монголо-Сибирского региона новые данные, проведенные обобщения и выявленные закономерности развития экзогенных геологических процессов в регионе следует рассматривать как основу для построения теоретических моделей современной экзогеодинамики, разработки путей детализации научно-исследовательских работ по исследованию особенностей развития отдельных групп экзогенных геологических процессов. Все это в совокупности позволит составить более четкое представление об эволюции литосферы Земли в условиях возрастающего техногенеза. Дальнейшие научные разработки в области экзогеодинамики должны быть нацелены на увеличение детализации при анализе многофакторности процессов, на разработку безопасных методов управления природно-техническими системами с учетом эффективности использования природного потенциала и экологических функций литосферы.

Список использованной литературы

Абалаков А.Д., Базарова Н.Б. Воздействие горнодобывающей промышленности на окружающую среду в Байкальском регионе // Инженерные изыскания. 2017. № 10. С. 54–64.

Абразионно-аккумулятивные процессы в береговой зоне водохранилищ (на примере Южного Приангарья и Силезской возвышенности). Сосновец–Иркутск: Факультет наук о Земле Силезского университета, 2002. 102 с.

Авакян А.Б. Водоохранилища гидроэлектростанций. М.: Энергия, 1977. 399 с.

Авакян А.Б., Салтанкин В.П., Шарапов В.А. Водоохранилища. М.: Изд-во «Мысль», 1987. 324 с.

Агафонов Б.П. Надводные и подводные склоны Байкальской впадины // Морфология рельефа. М.: Научный мир, 2004. С. 158–169.

Агафонов Б. П. Экзолигодинамика Байкальской рифтовой зоны / Б. П. Агафонов. – Новосибирск: Наука, 1990. 176 с.

Агафонов Б.П., Акулов Н.И. О природе подвижных песков на Ольхоне // Известия РАН. Серия географическая. 2006. № 5. С. 101–108.

Агафонов Б.П., Овчинников Г.И., Снытко В.А., Щипек Т. Эоловые фации побережий озера Байкал и Братского водохранилища // География и природные ресурсы. 2001. № 4. С. 92–98.

Алексеев С.В. Криогенез подземных вод и горных пород (на примере Далдыно-Алакитского района Западной Якутии). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 19 с.

Алексеев С.В. Геокриологические системы Якутской алмазоносной провинции: Автореф. дис. д-ра. ...геол.-мин. наук. Иркутск: Изд-во СО РАН, 2007. 34 с.

Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Светлаков А.А., Козырева Е.А., Васильчук Ю.К. Литология и строение бугров пучения в долине р. Сенца (Окинское плоскогорье, Восточные Саяны) // Арктика и Антарктика. 2017. № 2. С. 136–149.

Алексеев С.В., Гладков А.С., Алексеева Л.П., Кононов А.М., Карпенко М.А. Криогенное строение и тектоническая нарушенность горных пород в пределах Ботубинского полигона захоронения дренажных вод карьера трубки «Нюрбинская» // Проблемы и пути эффективной отработки алмазных месторождений: сборник докладов. Новосибирск: Наука, 2011. С. 545–548.

Алексеева Л.П., Алексеев С.В., Кононов А.М. Геохимические особенности подземных текстурообразующих льдов алмазоносных районов Западной Якутии // Лед и снег. 2014. № 1. С. 101–112.

Аржанникова А.В., Аржанников С.Г., Акулова В.В. Следы подпорного палеоозера в рельефе и осадках главных речных долин юга Иркутского амфитеатра // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 2. С. 161–170.

Астраханцев В.И., Пальшин Г.Б. О стоке Ангары на участке Пашки – Братск // Труды II совещания по подземным водам и инженерной геологии Восточной Сибири. Иркутск, 1959. Вып. 1. С. 114–125.

Атлас Иркутской области /под ред. Гриценко А.В./ Главное управление геодезии и картографии Министерства геологии и охраны недр СССР. Москва–Иркутск, 1962. 182 с.

Атлас. Иркутская область: экологические условия развития. Москва–Иркутск, 2004. 142 с.

Афолина Т.Е. Пономаренко Е.А., Коломина Т.М. Рекомендации по берегозащитному строительству и эксплуатации волногасящих берм в прибрежных участках оз. Байкал // Труды 3-й Международной конференции «Создание и использование искусственных земельных участков на берегах и акватории водных объектов». Иркутск: ИЗК СО РАН, 2013. С. 14–17.

Баженова О.И. Современная денудация в островных степях Сибири: автореф. дис. д-ра геогр. наук. Томск, 2011. 43 с.

Байкал. Атлас / под ред. Г.И. Галазия. М.: Госкартография, 1993. 160 с.

Байкаловедение: в 2 кн. Новосибирск: Наука, 2012. Кн. 1. 468 с.

Бат Б. Оценка и прогнозирование устойчивости геологической среды к природным и техногенным воздействиям территории города Улан-Батор: Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. 48 с.

Богучанское водохранилище. Подземные воды и инженерная геология. Новосибирск: Изд-во «Наука», 1979. 155 с.

Бондарик Г.К. Методика инженерно-геологических исследований: учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 333 с.

Бондарик Г.К. Общая теория инженерной (физической) геологии. М.: Недра, 1981. 256 с.

Бондарик Г.К., Чан Мань Л., Ярг Л.А. Научные основы и методика организации мониторинга крупных городов. М.: ПНИИИС, 2009. 260 с.

Братское водохранилище. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР / Под ред. Ф.И. Белых, В.А. Знаменского. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 166 с.

Братское водохранилище. Инженерная геология территории. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 273 с.

Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 352 с.

Васильев В.И., Шешеня Н.Л., Чеховской А.Л. Формирование инженерно-геологических условий Центральной Монголии. Новосибирск: Изд-во Наука, 1987. 142 с.

Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Изотопные методы в географии. Часть 1: Геохимия стабильных изотопов природных льдов: Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2011. 228 с.

Величко А.А. Природный процесс в плейстоцене: К IX конгрессу INQUA: Новая Зеландия. М.: Наука, 1973. 256 с.

Вика С., Козырева Е.А., Тржцинский Ю.Б., Щипек Т. Остров Ярки на Байкале – пример современного преобразования ландшафтов. Иркутск – Сосновец: Факультет наук о Земле Силезского университета, 2006. 69 с.

Вика С., Намзалов Б.-Ц. Б., Овчинников Г.И., Снытко В.А., Щипек Т. Пространственная структура эоловых урочищ восточного побережья озера Байкал. Иркутск: ИГ и ИЗК СО РАН, 2003. 76 с.

Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Прикладная гидрология. СПб.: Изд-во СПбГЛТУ, 2014. 196 с.

Винокуров М.А., Суходолов А.П. Экономика Иркутской области: В 4 т. Иркутск: Изд-во: БГУПЭ, 1998. 248 с.

Вологодский Г. П. Карст Южного Приангарья // Инженерно-геологические особенности приангарского промышленного района и их значение для строительства. М.: Наука, 1965. С. 49–106.

Геологические памятники Байкала. Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1993. 160 с.

Геология и полезные ископаемые Восточной Сибири. Новосибирск: Наука, 1985. 197 с.

Геология и сейсмичность зоны БАМ. Инженерная геология и инженерная сейсмология / Павлов О.В., Джурик В.И., Дреннов А.Ф. и др. Новосибирск: Наука, 1985. 191 с.

Геоморфология Северного Прибайкалья и Станового нагорья. М.: Наука, 1981. 202 с.

Геренчук К.И. Тектонические закономерности в орографии и речной сети Русской равнины. Львов: ЛГУ, 1960. 242 с.

Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Братское водохранилище. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 165 с.

Голенецкий С.И. Землетрясения юга Сибирской платформы по инструментальным сейсмологическим наблюдениям // Вулканология и сейсмология. 2001. № 6. С. 68–77.

Голенецкий С.И. Редкое землетрясение на юге Сибирской платформы // Доклады Академии наук. 1998. Т. 363, № 3. С. 392–395.

Голенецкий С. И. Сводка макросейсмических данных о землетрясениях на юге Сибирской платформы // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 8. С. 1245–1250.

Голенецкий С.И. Наведенная сейсмичность в районе Иркутского водохранилища у юго - западной оконечности озера Байкал // Геология и геофизика. 1997. Т. 38, № 10. С. 1692–1698.

Голодковская Г.А., Елисеев Ю.Б. Геологическая среда промышленных регионов. М.: Недра, 1989. 220 с.

Голодковская Г.А., Куринов М.Б. О систематизации и классифицировании объектов инженерной геологии // Теоретические проблемы инженерной геологии: Труды международной научной конференции. М.: Изд-во МГУ, 1999. С. 101–102.

Горбунова К.А. Карстоведение. Вопросы типологии и морфологии карста: учебное пособие по спецкурсу. Пермь: Перм. ун-т, 1985. 88 с.

Горная энциклопедия: в 5 т., т. 3: Кенган-Орт / Ред. Козловский Е. А. М.: Сов. энциклопедия, 1987. 592 с.

Горшков И.Ф. Гидрологические расчеты Л.: Гидрометеиздат, 1979. 430 с.

Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае за 2016 год». Красноярск, 2017. 289 с.

Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2012 году». Иркутск, 2013. 227 с.

Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2017 году». Иркутск, 2018. 249 с.

Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2011 году». Иркутск: Сибирский филиал ФГУНПП «Росгеолфонд», 2012. 413 с.

Гречищев Е.К. Метод расчета ширины зоны размыва берегов на примере Братского водохранилища. Иркутск: Восточно-Сибирский геологический институт СО АН СССР. 1961. 95 с.

Гречищев Е.К. Переработка байкальских берегов при повышении уровня озера // Тр. ВСФ АН СССР, 1958. Вып. 14. С. 108–113.

Гречищев Е.К., Астраханцев В.И., Ладохин Н.П. Некоторые вопросы инженерной геологии береговой зоны Байкала // Инженерная геология Прибайкалья. Новосибирск: Наука, 1968. С. 72–90.

Гречищев Е.К., Ладохин Н.П., Леонтьев О.К., Мякокин В.С. Карта геоморфологии и динамики берегов. Атлас Иркутской области. Москва–Иркутск: ГУГиК, 1962. 182 с.

Григорьев М.Н. Криоморфогенез и литодинамика прибрежно-шельфовой зоны морей Восточной Сибири: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Якутск, 2008. 40 с.

Демьянович Н.И. Прогноз оползней на Ангарских водохранилищах. Изд-во «Наука» Сибирское отделение, Новосибирск, 1976. 78 с.

Демьянович Н.И. Морфометрические методы оценки изменений геологической среды. // Проблемы охраны геологической среды, на примере Восточной Сибири. Новосибирск, Наука, 1993. С. 42-46.

Демьянович Н.И., Писарский Б.И., Васина М.Н. ТГС горно-добывающих районов // Проблемы охраны геологической среды (на примере Восточной Сибири). Новосибирск: Наука, 1993. С. 74–88.

Демьянович Н.И., Рященко Т.Г., Акулова В.В. Изменение состава, структуры и свойств пород // Проблемы охраны геологической среды (на примере Восточной Сибири). Новосибирск: Наука, 1993. С. 42–46.

Джурик В.И., Ключевский А.В., Серебренников С.П. и др. Сейсмичность и районирование сейсмической опасности территории Монголии. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. 420 с.

Дроздов А. В. Природные и техноприродные резервуары промышленных стоков в криолитозоне (на примере Якутской части Сибирской платформы). Якутск: Издательско-полиграфический комплекс СВФУ, 2011. 416 с.

Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. 507 с.

Ершов Э.Д., Мотенко Р.Г., Комаров И.А. Экспериментальное исследование теплофизических свойств и фазового состава влаги засоленных мерзлых грунтов // Геоэкология. № 3. 1999. С. 232–242.

Ершов Э.Д., Чеверев В.Г., Лебеденко Ю.П. Экспериментальные исследования миграции влаги в мерзлой зоне оттаивающих грунтов // Вестник Московского университета. № 1. Серия 4: Геология, 1976. С. 111–114.

Железняк М.Н. Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 2005. 227 с.

Задонина Н.В., Леви К.Г. Хронология природных и социальных феноменов в Сибири и Монголии. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2008. 759 с.

Замараев С.М. Краевые структуры южной части Сибирской платформы. М.: Наука, 1967. 248 с.

Зенкович В.П. Динамическая классификация морских берегов // Труды ИО АН СССР, 1954. Т. 10.

Золотарев Г.С. Методика инженерно-геологических исследований: учебник. М.: Изд-во МГУ, 1990. 384 с.

- Иванов И.П., Тржцинский Ю.Б. Инженерная геодинамика. СПб.: Наука, 2001. 416 с.
- Игнатов Е.И. Береговые морфосистемы. Москва–Смоленск: Маджента, 2004. 352 с.
- Изменения геологической среды и их прогноз. Новосибирск: Наука, 1985. 150 с.
- Иметхенов А.Б. Катастрофические явления в береговой зоне Байкала. Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 1994. 85 с.
- Иметхенов А.Б. Динамика изменений берегов // Байкал: природа и люди: Энцикл. справ. /Под ред. А.К. Тулохонова/. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2009. С. 227–232.
- Иметхенов А.Б. Позднекайнозойские отложения побережья озера Байкал. Новосибирск: Наука, 1987. 150 с.
- Инженерная геодинамика территории России / Под ред. В.Т. Трофимова и Э.В. Калинина. М.: Издательский дом «КДУ», 2013. 816 с.
- Инженерная геология Прибайкалья. М.: Наука, 1968. 188 с.
- Инженерная геология СССР. Т. 3. Восточная Сибирь.
- Иркутское водохранилище. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 140 с.
- История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. Плоскогорья и низменности Восточной Сибири / Отв. ред. Н.А. Флоренсов. М.: Из-во Наука, 1971. 319 с.
- Кадетова А.В. Инженерно-геодинамическая эволюция урбанизированных территорий (на примере г. Иркутска): Автореф. дис. ... канд. геол-мин. Наук. Иркутск, 2005. 17 с.
- Карнаухова Г.А. Процессы осадкообразования в водохранилищах Ангарского каскада: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Иркутск, 2009. 44 с.
- Катастрофическое Гоби-Алтайское землетрясение. Сейсмогеологический очерк. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 391 с.
- Климатические данные по Монголии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.climate-data.org>. (Дата обращения: 10.09.2018).
- Козляков И.В., Еремина О.Н., Миронов О.К. Геологический риск урбанизированных территорий (оценка и картографирование на примере г. Москвы) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. М.: Наука, 2018. № 5. С. 53–65.
- Козырева Е.А. Экзогенные геологические процессы и их роль в формировании берегов Братского водохранилища: Автореф. дис. ... канд. геол-мин. наук. Иркутск, 2002. 20 с.
- Козырева Е.А. Влияние гипсового карста на оползневые процессы южной части Братского водохранилища // XX Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика»: Сборник материалов. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2003. С. 220–222.

Козырева Е.А., Пеллинен В.А., Мазаева О.А., Хабидов А.Ш. Типы берегов острова Ольхон на озере Байкал // Геоморфология. 2014. № 3. С. 74–84.

Козырева Е.А., Рыбченко А.А., Мазаева О.А., Хак В.А., Кадетова А.В. Опасные инженерно-геологические процессы зоны влияния байкало-ангарской гидротехнической системы // ГеоРиск. 2012. № 3. С. 46–55.

Козырева Е.А., Рыбченко А.А., Тарасова Ю.С., Жентала М., Ягус А. Трансформации береговых зон водохранилищ в ходе эксплуатационного периода (Южное Приангарье, Верхнесилезский регион) // Вестник ИрГТУ. 2012. № 3 (62). С. 42–50.

Козырева Е.А., Рыбченко А.А., Щипек Т., Пеллинен В.А. Солифлюкционные оползни побережья острова Ольхон // Вестник ИрГТУ. 2011. № 4. С. 41–49.

Козырева Е.А., Тржцинский Ю.Б., Мазаева О.А. Карстово-оползневые и карстово-эрозионные процессы в локальных геосистемах береговых зон Братского водохранилища // Геоморфология. 2008. № 1. С. 36–42.

Козырева Е.А., Тржцинский Ю.Б., Леви К.Г. Оценка опасности проявления и прогноз геологических процессов в зонах прокладки транспортных магистралей // Сергеевские чтения. Опасные природные и техноприродные экзогенные процессы: закономерности развития, мониторинг и инженерная защита территорий. Вып. 9. М.: ГЕОС, 2007. С. 211–215.

Козырева Е.А., Тржцинский Ю.Б., Труфанов А. В., Федоренко Е.В. Катастрофическая активизация оползней – результат техногенных воздействий на геологическую среду.// Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Вып. 5. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2006. С. 138–150.

Кононов Е.А. Террасы озера Байкал и проблемы их изучения // Вестник ИрГТУ. № 5. (45). 2010. С. 42–47.

Коржуев С.С. Морфотектоника и рельеф земной поверхности (на примере происхождения и возраста рельефа Восточной Сибири). М.: Из-во Наука, 1974. 257 с.

Коржуев С.С. Скалывание (отседание) склонов в Средней Сибири // Труды Ин-та географии. Т. 28, вып. 28. Очерки по геоморфологии Южной Якутии. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 207–220.

Королев В.А. Мониторинг геологических литотехнических и эколого-геологических систем. М.: КДУ, 2007. 415 с.

Королев В.А. Мониторинг геологической среды: Учебник / Под ред. В.Т. Трофимова М.: Изд-во МГУ, 1995. 172 с.

Королев В.А., Галкин А.Н. Геологические и инженерно-геологические процессы и явления: определение и содержание понятий // Инженерная геодинамика. №3. 2011. С. 19-27.

Корытный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2001. 163 с.

Костровицкий С.И., Специус З.В., Яковлев Д.А., Фон-дер-Флаасс Г.С., Суворова Л.Ф., Богуш И.Н. Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции / Отв. ред. Н.П. Похиленко. Мирный: НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО), 2015. 480 с.

Котлов Ф.В. Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека. М.: Недра, 1978. 263 с.

Котляков В.М. Мир снега и льда. М.: Наука, 1994. 288 с.

Куделин В.М., Бейм А.М., Гречищев Е.К., Зубаренкова Г.Г., Васянович В.И., Бутыгин В.А. Методические указания по отсыпке берегозащитных сооружений волногоящих берм и пляжей из скального грунта на озере Байкал вдоль железной дороги. Иркутск, 1995. 23 с.

Кузьмин С.Б. Опасные геоморфологические процессы и риск природопользования / Отв. ред. В. М. Плюсин. Иркутск: Ин-та географии СО РАН

Кусковский В.С. Особенности формирования подпора подземных вод на глубоководных водохранилищах Сибири со скальными берегами // Инженерно-географические проблемы при строительстве в Сибири. Л.: Изд-во геогр. общества, 1974. С. 144–168.

Кусковский В.С., Овчинников Г.И., Павлов С.Х., Тржцинский Ю.Б., Орехова Е.С., Козырева Е.А. Экологические изменения геологической среды под влиянием крупных водохранилищ Сибири // Сибирский экологический журнал. 2000. № 2. С. 135–148.

Ладохин Н.П. К геоморфологии Байкальског шельфа // Известия СО АН СССР. 1958. № 1. С. 3–13.

Ламакин В.В. Неотектоника Байкальской впадины. М.: Наука, 1968. 247 с.

Лапердин В.К. Закономерности развития экзогенных геологических процессов в зонах влияния линейных природно-технических систем юга Восточной Сибири: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Иркутск, 2003. 45 с.

Лапердин В.К., Леви К.Г., Имаев В.С., Молочный В.Г. Опасные геологические процессы в Юго-Западном Прибайкалье. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2016. 206 с.

Леви К.Г. Кинематика раскрытия впадин Байкальской рифтовой зоны в свете плитотектонических концепций // Современная геодинамика и сейсмичность Байкальского региона. Иркутск, 1997. С. 84–108.

Леви К.Г., Задонина Н.В. Краткая Сибирская летопись (Кунгурская). Иркутск: Изд-во журнала «Время странствий», 2003. 184 с.

Леви К.Г., Задонина Н.В. Карта истории освоения Сибири (XVI – XVIII вв.). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2006.

Леви К.Г., Мирошниченко А.И., Козырева Е.А., Кадетова А.В. Модели эволюции озерных бассейнов Восточной Сибири в позднем плейстоцене и голоцене // Известия ИГУ. Серия Геоархеология. Этнология. Антропология. 2015. Т. 11. С. 31–85.

Леви К.Г., Тржцинский Ю.Б., Козырева Е.А. К оценке тектонического и экзогеодинамического риска деформаций и разрушения трубопроводных систем в условиях Восточной Сибири // Современная геодинамика и опасные геологические процессы. Иркутск: Вып. 5. 2006. С.150–174.

Леонтьев О.К. Основы геоморфологии морских берегов. М.: Изд-во МГУ, 1961. 418 с.

Лещиков Ф.Н. Формирование береговой зоны Братского водохранилища при низком уровненом режиме // Сборник материалов: Научные и практические основы управления техническим состоянием ангарских водохранилищ. Братск, 1984. С. 64–65.

Лещиков Ф.Н., Серов А.Г. Мерзлотные условия // Инженерно-геологические и гидрогеологические условия зоны влияния водохранилищ ангарского бассейна. Иркутск, 1986. С. 85–103.

Лещиков Ф.Н., Слесивцев В.И. Влияние сезонного промерзания на формирование берегов ангарских водохранилищ, сложенных лессовидными породами // Береговые процессы в криолитозоне. Новосибирск: Наука, 1984. С. 67–71.

Лехатинов А.М. Экзогенные геологические процессы и их прогноз: зона БАМ и сопредельные территории. Автореферат дис. Доктора геологи-минералогических наук. Москва-Иркутск, 2004. 75 с.

Литвин В.М. Макет обзорной карты эрозионной пораженности земель // Материалы XXIII пленума геоморф. комиссии РАН. Волгоград: Перемена, 1996. С. 127–129.

Литвин В.М. Региональная инженерно-геологическая оценка экзогенных геологических процессов юга Восточной Сибири: Автореф. дис. ...канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 1989. 21 с.

Литвин В.М. Техногенное изменение экзогеодинамической обстановки на западном участке БАМ и прогноз ЭГП / Изменения геол. среды и их прогноз. – Новосибирск, Наука, 1985. с. 108-123.

Литвин В.М., Тржцинский Ю.Б. Оценка интенсивности экзогенных геологических процессов (ЭГП). // Проблемы охраны геол. среды (на примере Восточной Сибири). Новосибирск, Наука, 1993, с. 46-49.

Литвин В.М., Павлов С.Х., Тржцинский Ю.Б. Карстовые районы лесостепного Приангарья // Путеводитель по карстовым районам Восточной Сибири и Урала. Сосновец: Изд-во Силезского ун-та, 1996. 114 с.

Литвин В.М., Тржцинский Ю.Б. Наземные транспортные магистрали // Проблемы охраны геологической среды (на примере Восточной Сибири). Новосибирск: Наука, 1993. С. 124–132.

Логачев Н.А. Стратиграфия. Кайнозойская группа // Геология СССР. Т. 35. Бурятская АССР. М.; 1964. С. 258–281.

Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. Л.: Недра, 1977. 479 с.

Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. Л.: Недра, 1990. 328 с.

Лунина О.В., Гладков А.С., Шерстянкин П.П. Новая электронная карта активных разломов юга Восточной Сибири // Докл. РАН. 2010. Т. 433, № 5. С. 662–667.

Лут Б.Ф. Геоморфология дна Байкала // Геоморфология дна Байкала и его берегов. М.: изд-во Наука, 1964. С. 5–124.

Мазаева О.А., Хак В.А., Козырева Е.А. Оценка основных процессообразующих факторов развития экзогенных геологических процессов в локальных природно-технических геосистемах (на примере участка Быково, Братское водохранилище) // Вестник ИрГТУ. 2011. № 2. С. 41–47.

Мазаева О.А., Хак В.А., Козырева Е.А. Эрозионно-оползневой тип взаимодействия в локальных береговых геосистемах (на примере Братского водохранилища) // Известия ИГУ. Серия «Наук о Земле». 2012. Т. 5. № 1. С. 205–223.

Мазаева О.А., Рыбченко А.А., Козырева Е.А. Опасные геологические процессы Улан-Баторского бассейна: инженерно-геологическая оценка эрозии временных водотоков // Всероссийское совещание «Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе»: Сборник науч. материалов. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. Т. 2. С. 110–113.

Майдар Д., Турчин П., Сайн-эр Д. Градостроительство МНР. Улан-Батор, 1983. 44 с.

Макаров С.А., Рященко Т.Г., Акулова В.В. Геоэкологический анализ территорий распространения природно-техногенных процессов в неоген-четвертичных отложениях Прибайкалья. Новосибирск: Наука. СИФ РАН, 2000. 160 с.

Матарзин Ю.М. Гидрология водохранилищ: Учебник по направлению «Гидрометеорология» и специальности «Гидрология». Пермь: ПГУ, 2003. 296 с.

Мац В.Д. Байкальские террасы низкого комплекса // Природа Байкала. Л.: Геогр. об-во СССР, 1974. С. 31–57.

Мац В.Д. Кайнозой Байкальской впадины: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Иркутск, 1987. 42 с.

Мац В.Д. Возраст и геодинамическая природа осадочного выполнения Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 9. С.1219–1244.

Мац В.Д., Ефимова И.М. Палеогеографический сценарий позднего мела-кайнозоя центральной части Байкальского региона // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2. № 2. С. 175–193.

Мац В.Д., Корнутова Е.И., Покатилов А.Г., Бабанский В.Н., Белова В.А. К стратиграфии четвертичных отложений Северного Байкала // Динамика Байкальской впадины. Новосибирск: Наука, 1975. С. 258–273.

Методика мерзлотной съемки / Под ред. В.А. Кудрявцева. М.: Изд-во МГУ, 1979. 358 с.

Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород / Под ред. Е.М. Сергеева М.: Недра, Т. 1. 1984. 423 с.

Методы геокриологических исследований: Учеб. пособие / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 2004. 512 с.

Мильков Ф.Н. Физическая география: учение о ландшафте и географическая зональность. Воронеж: ВГУ, 1986. 328 с.

Нарантуяа Н. Планировка и застройка Улан-Батора // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. № 19. С. 177–189.

Национальный атлас России. Т. 2: Природа. Экология / Гл. ред. В. М. Котляков. М.: Роскартография, 2007. 495 с.

Овсяченко А.Н., Шварев С.В., Мараханов А.В. Активные разломы и палеосейсмогеология центральной части Иркутского амфитеатра // Геофизические исследования. 2007. Вып. 7. С. 74–90.

Овчинников Г.И. Динамика береговой зоны Ангарских водохранилищ: Автореф. дис. ... д-ра географ. наук. Иркутск, 2003. 50 с.

Овчинников Г.И., Карнаухова Г.А. Прибрежные наносы и донные отложения Братского водохранилища. Новосибирск: Наука. СО РАН, 1985. 69 с.

Овчинников Г.И., Павлов С.Х., Тржцинский Ю.Б. Изменение геологической среды в зоне влияния Ангаро-Енисейских водохранилищ. Новосибирск: Наука, 1999. 254 с.

Опасные геологические процессы и прогнозирование чрезвычайных ситуаций природного характера на территории Центральной Монголии / Отв. ред.: Д.П. Гладкочуб. Иркутск: ИГУ, 2017. 331 с.

Осипов В.И. Природные опасности: мониторинг и оповещение // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, М.: Наука, 2013. № 3. С. 209–215.

Осипов В.И., Еремина О.Н., Козлякова И.В. Оценка экзогенных опасностей и геологического риска на урбанизированных территориях (Обзор зарубежного опыта) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. М.: Наука, 2017. № 3. С. 3–15

Осипов В.И., Кутепов В.М., Зверев В.П. и др. Опасные экзогенные процессы. М.: Изд-во «ГЕОС», 1999. 290 с.

Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: «ГЕОС», 2013. 576 с.

Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях / Под ред. В. А. Кудрявцева. М.: Изд-во МГУ, 1974. 431 с.

Оюунгэрэл Б. Эколого-географические основы функционирования и перспективы развития особо охраняемых территорий Северной Монголии: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Улан-Удэ, 2011. 48 с.

Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: «ГЕО», 2008. 229 с.

Павлов О.В. Инженерная геология зоны ангарского надвига // Инженерно-геологические особенности Приангарского промышленного района и их значение для строительства. М., изд-во «Наука», 1965.

Павлов С.Х. Гидродинамические и гидрохимические особенности зоны подпора на верхнем участке Братского водохранилища // Региональная гидрогеология и инженерная геология Восточной Сибири. Новосибирск: Наука, 1978. С. 97–104.

Павлов С.Х. Закономерности формирования подземных вод зоны подпора водохранилища Братской ГЭС: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 1983. 18 с.

Пальшин Г.Б. Оползни на берегах Байкала. Изв. Вост. Фил. АН СССР, 1957, №4-5.

Пармузин Ю.П. Равновесие ландшафтной структуры бассейна и динамика котловины // Динамика Байкальской впадины. Новосибирск: Наука, 1975. С. 5–14.

Парфеевец А.В., Саньков В.А. Напряженное состояние земной коры и геодинамика юго-западной части Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: «ГЕО», 2006. 151 с.

Пережилин А.И., Корпачев В.П., Андрияс А.А., Попова А.А. Состояние Богучанского водохранилища в период наполнения // IX Международная конференция «Реки Сибири и Дальнего Востока»: Сборник науч. материалов. Иркутск–Байкальск, 2015. С. 167–171.

Перов В.Ф. Селеведение: Учебное пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 272 с.

Печеркин И.А. Геодинамика побережий камских водохранилищ. Пермь, 1969. Т. 2. 308 с.

Пинегин А.В., Рогозин А.А., Лещиков Ф.Н. и др. Динамика берегов озера Байкал при новом уронежном режиме. М.: Наука, 1976. 88 с.

Пинегин А.В. Основные закономерности формирования и динамика береговой зоны оз. Байкал: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск. 1975. 147 с.

Пиннекер Е.В., Вологодский Г.П. Гидрогеологические условия и вопросы изменения режима подземных вод на верхнем участке Братского водохранилища. // Вопросы специальной гидрогеологии Сибири и Дальнего Востока. Иркутск, 1962. Вып. 1. С. 196–207.

Писарский Б.И. ТГС районов интенсивного сельскохозяйственного освоения // Проблемы охраны геологической среды (на примере Восточной Сибири). Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1993. С. 55–57.

Писарский Б.И., Демьянович Н.И., Васина М.Н. Проблемы охраны геологической среды в горно-добывающих районах Восточной Сибири // Земная кора и верхняя мантия Восточной Сибири. Иркутск: ВСФ АН СССР, 1987. С. 170–179.

Плешко А.В. Перспективы развития железнодорожной инфраструктуры региона // IV международная конференция, посвященная 355-летию со дня основания города Иркутска «Транспортная инфраструктура Сибирского региона»: Сборник науч. материалов. Иркутск: ИрГУПС, 2016. Т. 1. С. 7–13.

Плюснин В.М., Владимиров И.Н. Территориальное планирование Центральной экологической зоны Байкальской природной территории. Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО», 2013. 411 с.

Попов И.В. Инженерная геологии СССР. Т. 1. Общие основы региональной инженерной геологии: Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 1961. 177 с.

Попов И.И., Окатов Р.П. Борьба с оползнями на карьерах. М.: «Недра», 1980. 239 с.

Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 447 с.

Потёмкина Т.Г., Ярославцев Н.А., Петров В.А. Современные потоки наносов у острова Ярки (северный Байкал) // Успехи современного естествознания. 2008. № 8. С. 113–114.

Пояснительная записка к инженерно-геологической карте территории г. Улан-Батор масштаба 1:10000. Улан-Батор, 1986. 552 с.

Правила использования водных ресурсов Богучанского водохранилища Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации (ПРИКАЗ от 20 ноября 2015 года N 244). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902154600>. 15.08.2018

Природные опасности России. Оценка и управление природными рисками / Под ред. А.Л. Рагозина. М.: Издательская фирма «КРУК», 2003. 320 с.

Проблема охраны геологической среды (на примере Восточной Сибири) / отв. редактор Е. В. Пиннекер. Новосибирск: Наука, 1993. 168 с.

Пуляевский Г.М., Пинегин А.В., Овчинников Г.И., Некрасов В.Л. Размывы берегов ангарских водохранилищ // Известия Вост.- Сиб. геогр. общ-ва СССР, Иркутск, 1971. Т. 68, С. 19–26.

Пуляевский Г.М., Лещиков Ф.Н., Рогозин А.А. и др. Формирование берегов ангарских водохранилищ. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1976. 72 с.

Радзиминович Я.Б., Щетников А.А. Сейсмическая активность южной окраины Сибирской платформы в историческом прошлом: новые данные // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 9. С. 926–938.

Раскатов Г.И. Геоморфология и тектоника территории Воронежской антеклизы. Воронеж: ВГУ, 1969. 164 с.

Рогозин А.А. Береговая зона Байкала и Хубсугула. Морфология, динамика и история развития. Новосибирск: ВО «Наука», 1993. 168 с.

Рогозин А.А., Тржцинский Ю.Б. Техногенная активизация абразионно-аккумулятивных процессов на берегах Байкала // Геоэкология. 1993. № 6. С. 80–85.

Розенбайм Г.Э., Шполянкая Н.А. Криолитозона российской Арктики в среднем плейстоцене – голоцене // Известия РАН. Сер. геогр. 1998. С. 32–48.

Розенбаум Г.Э., Шполянская Н.А. Позднекайнозойская история криолитозоны Арктики и тенденции ее будущего развития. М.: Научный мир, 2000. 104 с.

Рыбченко А.А. Инженерно-геодинамическая оценка современного состояния геологической среды г. Иркутска: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск. 2009. 17 с.

Рыбченко А.А., Кадетова А.В. Методика оценки опасности ЭГП с использованием ГИС-программ. // Сергеевские чтения 11. Моделирование при решении геоэкологических задач. М.: ГЕОС, 2009. С. 82–85.

Рыбченко А.А., Кадетова А.В., Козырева Е.А. Результаты использования трехмерных моделей при мониторинге абразионного участка «Солнечный» (Иркутское водохранилище) // Вестник ИрГТУ. 2012. № 4 (63). С. 61–67.

Рыбченко А.А., Козырева Е.А., Мазаева О.А. Сертификат Роспатента об интеллектуальной собственности базы данных (БД №2017621004) «Морфометрические параметры водосборных бассейнов Улан-Баторской агломерации» (2017)

Рыжов Ю.В. Формирование оврагов на юге Восточной Сибири. Новосибирск: «ГЕО», 2015. 180 с.

Рященко Т.Г. Типизация геологической среды территории Улан-Батора (картографическая модель) // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Вып. 7. Материалы IX Российско-Монгольская конференция по астрономии и геофизике. 2011. С. 127-133.

Рященко Т.Г. Принципы типизации геологической среды для целей сейсмического микрорайонирования районов разработки полезных ископаемых (на примере Эрдэнэта и Уланбатора, Монголия) // Сергеевские чтения. Выпуск 19, 2017. С. 557-561.

Рященко С.В., Богданов В.Н., Романова О.И. Региональный анализ рекреационной деятельности. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2008. 143 с.

Рященко Т.Г. Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2010. 287 с.

Рященко Т.Г., Акулова В.В., Макаров С.А. Оценочная шкала устойчивости дисперсных грунтов к геодинамическим воздействиям // Геоэкология. 2000. № 2. С. 157–164.

Рященко Т.Г., Акулова В.В., Ухова Н.Н. и др. Лессовые грунты Монголо-Сибирского региона. Иркутск: ИЗК СО РАН. 2014. 241 с.

Рященко Т. Г., Данилова Т.Ф. К методике прогноза физико-химической активности пород и минерального состава их глинистых фракций // Изменение геологической среды и их прогноз. Новосибирск: Наука, 1985. С. 36–42.

Рященко Т.Г., Данилова Т.Ф., Нетесова Г.Е., Малышева Л.В., Акулова В.В. Инженерно-геологическая оценка мезо-кайнозойских отложений (Восточная Сибирь и Монголия). Новосибирск: ВО «Наука», Сибирская издательская фирма, 1992. 120 с.

Савельев В.А. Современные проблемы и будущее гидроэнергетики Сибири. Новосибирск: Наука, 2000. 200 с.

Самбуу Г. Геоэкологическая оценка урбанизированных территорий на основе ландшафтно-геохимического подхода (на примере г. Улан-Батора): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Хабаровск, 2013. 19 с.

Сашурин А.Д., Панджин А.А., Мельник В.В. Обеспечение устойчивости бортов карьеров в целях защиты потенциально опасных участков транспортных берм // Вестник Магнитогорского ГТУ им. Г.И. Носова. 2016. Т.14, № 3. С. 5–12.

Светлаков А.А. Особенности температурного режима грунтов в условиях южной геокриологической зоны Восточной Сибири: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 2018. 15 с.

Семинский К.Ж., Радзиминович Я.Б. Сейсмичность юга сибирской платформы: пространственно-временная характеристика и генезис // Физика Земли. 2007. Т. 43, № 9. С. 726–737.

Сергеев Е.М. Инженерная геология. 2-е изд., М.: Изд-во МГУ, 1982. 248 с.

Сергеев Е.М. Теоретические основы инженерной геологии. Ч. 1. Геологические основы: Учебн. пособие для вузов. Л.: Недра, 1978. 496 с.

Серов А.Г., Тржцинский Ю.Б. Состав и свойства пород коренной основы. // Богучанское водохранилище, подземные воды и инженерная геология. Новосибирск: Наука, 1979. С. 61–68.

Славин В.И., Тычино Н.Я., Бабошина О.А. Геотермические условия осадочного чехла Сибирской платформы // Известия АН СССР. Серия Геологическая. 1980. № 5. С. 5–13.

Слепцов В.И., Курилко А.С. Расчет динамики осыпания бортов карьера для карбонатных пород разной морозостойкости // Геомеханика. 2013. № 1. С. 34–41.

Словарь по инженерной геологии В.Д. Ломтадзе; Санкт-Петербургский горный институт. СПб, 1999. 360с.

СНиП 2.01.15-90 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов.

СНиП 2.06.15-85 Инженерная защита территории от затопления и подтопления

Соколов Н.И. О типах смещения скальных трещиноватых пород на склонах // Труды лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР. М., 1961. Т. XXV. С. 79–97.

Соколов Н.И. Явления отседания склонов и глыбовые оползни ангарского типа // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1955. Т. XXX. С. 59–70.

Сочава В.Б. Геотопология как раздел учения о геосистемах // Типологические аспекты учения о геосистемах. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1974. С. 3–86.

Сочавы. Новосибирск: «ГЕО», 2009. 195 с.

Таланов Е.А. Региональная оценка эколого-экономического риска от водной эрозии и селей. Алматы, 2007. 352 с.

Тарасова Ю.С., Козырева Е.А. Формирование и развитие береговой зоны Иркутского водохранилища // Geographia, studia et dissertationes. 2011. № 33. С. 47–62.

Татевосян Р.Э., Мокрушина Н.Г. Макросейсмические сведения о землетрясениях Восточной Сибири в XVIII – первой половине XIX вв // Вопросы инженерной сейсмологии. 2013. Т. 40, № 4. С. 21–41.

Тимошкин О.А., Мальник В.В., Сакирко М.В., Боедекер К. Экологический кризис на Байкале: ученые ставят диагноз // Наука из первых рук. 2014. № 5 (59).

Тимошкин О.А., Бондаренко Н.А., Волкова Е.А. и др. Массовое развитие зеленых нитчатых водорослей родов *Spirogyra* и *Stigeoclonium* (Chlorophyta) в прибрежной зоне Южного Байкала // Гидробиологический журнал. 2014. Т. 50, № 5. С. 15–26.

Тржцинский Ю.Б. Глубокие оползни Восточной Сибири // Геоэкология. 1996. № 5. С. 74–78.

Тржцинский Ю.Б., Будз М.Д., Зарубин Н.Е. Оползни, сели, термокарст в Восточной Сибири и их инженерно-геологическое значение. М.: Наука, 1969. 134 с.

Тржцинский Ю.Б., Козырева Е.А., Верховин И.И. Инженерно-геологические особенности Иркутского амфитеатра. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005. 124 с.

Тржцинский Ю.Б., Козырева Е.А., Лапердин В.К., Залуцкий В.Т., Попов О.Ю. Инженерно-геологические особенности Казанканского участка БАМ // Сергеевские чтения М.: ГЕОС, Вып. 6, 2004. С. 438–442.

Тржцинский Ю.Б., Козырева Е.А., Мазаева О.А., Хак В.А. Современная экзогеодинамика юга Сибирского региона. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007. 155 с.

Тржцинский Ю.Б., Козырева Е.А., Радзиминович Я.Б. Влияние сейсмических событий на оползневые деформации берегов Братского водохранилища // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, С. 795–797.

Тржцинский Ю.Б., Павлов С.Х., Козырева Е.А. Оползни в карстующихся породах Верхнего Приангарья // География и природные ресурсы. 2003. № 1. С. 87–93.

Трофимов В.Т. Экологическая геодинамика: Учебник. М.: КДУ, 2008. 472 с.

Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г. Экологическая геология: Учебник для вузов. М.: ЗАЩ «Геоинформатик», 2002. 415 с.

Трофимов В.Т., Королев В.А. Геологическая среда как ноосферная категория // Вестник МГСУ. 2013. № 11. С. 188–193.

Турутанов Е.Х., Арвисбаатар Н., Буянтогтох Б., Цэндсурэн Д. Морфология осадочных отложений Тольской впадины (Монголия) по гравиметрическим данным // Вестник ИрГТУ. 2014. №7 (90). С. 54–63.

Туул Я. Гидрологическое обоснование защиты г. Улан-Батора от наводнений (Монголия): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 22 с.

Усть-Илимское водохранилище. Подземные воды и инженерная геология территории. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1975. 215 с.

Уфимцев Г.Ф., Сквитина Т.М., Потемкина Т.Г., Филинов И.А., Щетников А.А. Узоры байкальских берегов // География и природные ресурсы. 2009. № 4. С. 12–19.

Филиппов В.М. Активизация карста, коррозия и сопутствующие экзодинамические процессы побережий водохранилищ. // Инженерно-геологические проблемы Камских водохранилищ: Сборник науч. материалов. Пермь, 1983. С.19-20.

Филиппов В. М. Древняя закарстованность и активизация сульфатно-карбонатного карста побережья Братского водохранилища // Конференция «Научные и практические основы управления техническим состоянием Ангарских водохранилищ»: Сборник науч. материалов. Братск, 1984. С. 72–74.

Филиппов В. М. Динамика карста зоны влияния ангарских водохранилищ: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Л., 1988. 17 с.

Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. – М.: Недра, 1965.

Флоренсов Н.А. К морфологии берегов Северного и Среднего Байкала // Геоморфология дна Байкала и его берегов. М.: Наука, 1964. 143 с.

Формирование инженерно-геологических условий Центральной Монголии / В.И. Васильев, Н.Л. Шешеня, А.Л. Чеховский. М.: Наука, 1987. 142 с.

Хабидов А.Ш., Леонтьев И.О., Марусин К.В., Шлычков В.А., Савкин В.М., Кусковский В.С. Управление состоянием берегов водохранилищ. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 239 с.

Хандуева В.Д. Геоэкологические проблемы южного побережья озера Байкал: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Улан-Удэ, 2007. 24 с.

Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Власов А.Н., Козырева Е.А., Рыбченко А.А., Светлаков А.А. Криогенные и посткриогенные образования на острове Ольхон // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX, № 4. С. 54–63.

Хлыстов О.М., Ханаев И.В., Грачев М.А. Свидетельства низкого стояния уровня озера Байкал во время последнего ледниковья // Доклады РАН. 2008. Т. 422, № 2. С. 254–257.

Чарушин Г.В. Тектоническая трещиноватость слабо дислоцированных осадочных пород юго-востока Иркутского амфитеатра. // Бюл. МОИП, отд. геол., вып. 3. 1957. Т.32, С. 117–135.

Чернигова Д.Р. Сельскохозяйственное землепользование Иркутской области в новых социально-экономических условиях: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Пермь, 2013. 19 с.

Черский И.Д. Предварительный отчет о геологическом исследовании береговой полосы озера Байкал. // Изв. Вост.-Сиб. отделение РГО. 1880. Т. XI, № 1-2. С. 8–83.

Чипизубов А.В., Аржанникова А.В., Воробьева Г.А., Бердников Н.Е. Погребенные палеосейсмодислокации на юге Сибирской платформы // Доклады РАН. 2001. Т. 379, № 1 С. 101–103.

Швебс Г.И. Формирование водной эрозии стока наносов и их оценка (на примере Украины и Молдавии). Л.: Гидрометеиздат, 1974. 183 с.

Шеко А.И., Лехатинов А.М., Максимов М.М. и др. Оценка интенсивности проявления инженерно-геологических процессов при инженерно-геологическом картировании // Труды ВСЕГИНГЕО.01971. Вып. 43. С. 89–95.

Шенькман Б.М. Изменение гидрогеологической ситуации в долине реки Ангары в связи с зарегулированием стока // Проблема охраны геологической среды (на примере Восточной Сибири). Новосибирск: Наука, 1993. С. 103–116.

Шерман С.И., Леви К.Г. Трансформные разломы Байкальской рифтовой зоны // Докл. АН СССР. 1977. Т. 233, № 2. С. 454–464.

Шерман С.И., Леви К.Г. Трансформные разломы Байкальской рифтовой зоны и сейсмичность ее флангов // Тектоника и сейсмичность континентальных рифтовых зон. М.: Наука, 1978. С. 7–18.

Шуйский Ю.Д. Проблемы исследования баланса наносов в береговой зоне морей. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 240 с.

Экзарьян В.Н. Эколого-экономическая оценка техногенных последствий от изменений геологической среды как основа перехода на модель устойчивого развития // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2014. № 3, С. 242–251.

Экзогенные процессы в геологической среде. Оценка природных опасностей / Отв. ред. А.Т. Янковский, Е.А. Козырева]. Иркутск – Сосновец: ИЗК СО РАН, 2008. 106 с.

Экологические функции литосферы / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2000. 432 с.

Экологический атлас бассейна озера Байкал. Иркутск: Изд-во ИГ им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015. 145 с.

Angillieri M.Y.E. Morphometric Analysis of Colanguil River Basin and Flash Flood Hazard, San Juan, Argentina // Journal of Environmental Geology. 2008. V. 55, № 1. P.107–111. DOI: 10.1007/s00254-007-0969-2.

Asadollahfardi G., Aghda M.F., & Rahbar M. Case study of reservoir triggered seismicity // Journal of the Geological Society of India. 2013. V. 82, № 5. P. 553–560. Doi: 10.1007/s12594-013-0187-3.

Atlas of geological maps of Central Asia and adjacent areas 1:2 500 000 / Daukeev S.Z., Kim B.C., Li Tingdong, Petrov O.V., Tomurtogoo O. China, Russia, Kazakhstan, R.O. Korea, Mongolia., Beijin: Geological Publishing House, 2008. Sheets 9. (En.)

Bovis M.J., Jakob M. The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity // Journal of Earth Surf Process Landforms 1999. V. 24, P.1039–1054.

Carder D.S. Seismic investigations in the Boulder Dam area, 1940–1944, and the influence of reservoir loading on earthquake activity // *Journal of Bulletin of the Seismological Society of America*. 1945. V. 35 (4). P. 175–192.

Chipizubov A.V. Strong Earthquakes in the Pribaikalie: macroseismic data // *Journal of Seismic Instruments*. 2010. V. 46, № 3. P. 177–192. Doi: 10.3103/s0747923910020064.

Gladkochub D., Pisarevsky, S., Donskaya T., Natapov L., Mazukabzov A., Stanevich A., Sklyarov E. Siberian Craton and its evolution in terms of Rodinia hypothesis // *Journal of Episodes*. 2006. V. 29, № 3. P. 169–174.

Golenetsky S.I., Misharina L.A. Seismicity and earthquake focal mechanisms in the Baikal rift zone // *Journal of Tectonophysics*. 1978. V. 45, № 1. P. 71–85. doi:10.1016/0040-1951(78)90225-1.

Grosse G., Romanovsky V.E., Jorgenson T., Walter K.M., Brown J., Overduin P.P. Vulnerability and feedbacks of permafrost to climate change. 2011 // *Eos* 92:73–74.

Gupta H.K. A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India // *Journal of Earth-Science Reviews*. 2002. V. 58(3). P. 279–310. Doi: 10.1016/S0012-8252(02)00063-6.

Gupta H.K., Rastogi B.K., Narain H. Common features of the reservoir-associated seismic activities // *Journal of Bulletin of the Seismological Society of America*. 1972. V. 62, № 2. P. 481–492.

Horton R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology // *Journal of Geological society of America bulletin*. 1945. V. 56, № 3. P. 275–370.

Hugelius G., Tarnocai C., Bockheim J.G., Camill P., Elberling B., Grosse G., Harden J.W., Michaelson G., Mishra U., Palmtag J., Ping C-L., O'Donnell J., Schirrmeister L., Schuur E.A.G., Sheng Y., Smith L.C., Strauss J., Yu Z. A new data set for estimating organic carbon storage to 3 m depth in soils of the northern circumpolar permafrost region // *Earth System Science Data*. 2013. № 5. P. 393–402. Doi:10.5194/essd-5-393-2013.

Huijie Xiao, Zhidong Luo, Qiaogang Niu, Jiang Chang The 2010 Zhouqu mudflow disaster: possible causes, human contributions, and lessons learned // *Journal of Natural Hazards*. 2013. V. 67, № 2. P. 611– 625. Doi: 10.1007/s11069-013-0592-3

Kadetova A.V., Rybchenko A.A., Kozireva E.A., & Pellinen V.A. Debris flows of 28 June 2014 near the Arshan village (Siberia, Republic of Buryatia, Russia) // *Landslides*. 2016. V. 13, Issue 1. P. 129–140. Doi:10.1007/s10346-015-0661-7.

Kozyreva E.A., Trzhtsinsky Yu.B. Karst and its correlation with other geological processes (with reference to the zone of influence of Bratsk Reservoir) // *Newsletter. Guangxi normal*

university press. China. 2004. № 4. P. 67–82.

Mel'nikova V.I., Gileva N.A., Radziminovich N.A., Masal'skii O.K., Chechel'nitskii V.V. Seismicity of the Baikal rift zone for the digital recording period of earthquake observation (2001–2006) // *Journal of Seismic Instruments*. 2010. V. 46, № 2. P. 193–206. doi:10.3103/S0747923910020076.

Melton M. A. The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona // *The Journal of Geology*. 1965. V. 73, № 1. P. 1–38.

Nelson F.E., Anisimov O.A., Shiklomanov N.I. Climate change and hazard zonation in the circum-arctic permafrost regions // *Journal of Natural Hazards*. 2002. V. 26, № 3. P. 203–225.

Norikazu Matsuoka Solifluction and mudflow on a limestone periglacial slope in the Swiss Alps: 14 years of monitoring // *Journal of Permafrost and Periglacial Processes*. 2010. V. 21, № 3. P. 219–240.

Pavlenov V.A., Sherman S.I. Premises of induced seismicity on the reservoirs of the Angara River // *IASPEI Regional Assembly in Asia*. 1996. Tangshan. China. P. 293.

Peinke J., Matcharashvili T., Chelidze T., Gogiashvili J., Nawroth A., Lursmanashvili O., Javakhishvili Z. Influence of periodic variations in water level on regional seismic activity around a large reservoir: Field data and laboratory model // *Journal of Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2006. V. 156, № 2. P. 130–142. Doi:10.1016/j.pepi.2006.02.010.

Pellinen V.A., Mazaeva O.A., Tarasova J.S. Features of gully development at the Molodezhny site (Irkutsk reservoir) // *Z badan nad wplywem antropopresji na srodowisko*. 2015. V. 16, P. 72–79.

Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K. G., & Kendall A. D. Origins and methodology of the Russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales // *Journal of Seismological Research Letters*. 2007. V. 78, № 6. P. 579–590. Doi:10.1785/gssrl.78.6.579.

Ryashchenko T.G., Akulova V.V., Erbaeva M.A. Loessial soils of Priangaria, Transbaikalia, Mongolia and northwestern China // *Journal of Quaternary International*. 2008. № 179. P. 90.

Schumm S.A. Evolution of Drainage Systems & Slopes in Badlands at Perth Anboy, New Jersey // *Bulletin of the Geological Society of America*. 1956. V. 67. P. 597–646.

Seminskii K.Zh., Radziminovich Yan B. Seismicity of the southern Siberian platform: Spatiotemporal characteristics and genesis // *Journal of Izvestiya Physics of the Solid Earth*. 2007. V. 43, № 9. P. 726–737

Seredkina A., Melnikova V., Gileva N., Radziminovich Y. The Mw 4.3 January 17. 2014, earthquake: very rare seismic event the Siberian platform // *Journal of Seismology*. 2015. V. 19. № 3. P. 685–694. DOI 10.1007/s10950-015-9487-y.

Simpson D.W. Triggered earthquakes // *Journal of Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1986. V. 14, P. 21–42.

Utkucu M. Implications for the water level change triggered moderate ($M \geq 4.0$) earthquakes in Lake Van basin, Eastern Turkey // *Journal of Seismology*. 2006. V. 10, № 1. P. 105–117. Doi:10.1007/s10950-005-9002-y.

Waikar M.L., Nilawar Aditya P. Morphometric Analysis of a Drainage Basin Using Geographical Information System: A Case study // *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*. 2014. P. 179–184.

Waters C.N. et al. The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene // *Journal of Science*. 2016. V. 351. Issue 6269. Doi:10.1126/science.aad2622.

Wilford D.J., Innes J.L., Sakals M.E. Forest management on fans: hydrogeomorphic hazards and general prescriptions. – British Columbia, Ministry of Forests, Forest Science Program, 2005. P. 42

World Bank. 2006. Mongolia Environment Monitor: A Review of Environmental and Social Impacts in the Mining Sector Mongolia [Электронный ресурс]. <http://siteresources.worldbank.org/INTMONGOLIA/Resources/Mongolia-Mining.pdf> (Дата обращения 05.10.18).