

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Сорокоумова Яна Владиславовна

**Техногенные и природные миграционные процессы в подземных водах,
разгружающихся в озеро Байкал**

1.6.6. Гидрогеология

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук
Расторгуев Александр Владиминович

Москва – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Характеристика природных и техногенных условий в изучаемом районе	11
1.1. Природные условия	11
1.1.1. Физико-географический очерк.....	11
1.1.2. Гидрологические условия.....	13
1.1.3. Геологическое строение	17
1.1.4. Гидрогеологические условия	19
1.2. Техногенные условия.....	21
1.3. Выводы к главе 1	41
Глава 2. Техногенные миграционные процессы в подземных водах побережья озера Байкал	42
2.1. Конвективно-дисперсионный перенос растворенных веществ в водоносных горизонтах	42
2.2. Теплоперенос в водоносных горизонтах	46
2.3. Геомиграционная модель участка исследований.....	48
2.4. Моделирование массопереноса консервативного вещества.....	55
2.5. Моделирование массопереноса неконсервативного вещества.....	62
2.6. Моделирование теплопереноса	72
2.7. Выводы к главе 2.....	76
Глава 3. Природные миграционные процессы в акватории озера Байкал	79
3.1. Расчет притока растворенного метана	92
3.1.1. Геомиграционная модель разломной зоны.....	98
3.1.2. Моделирование массопереноса растворенного метана.....	106
3.2. Выводы к главе 3.....	112
Заключение.....	113
Список литературы.....	118

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования

Воды озера Байкал и его донные отложения являются уникальным биогеоценозом с большим количеством эндемичных организмов. Поступление даже небольших массовых расходов контаминантов может представлять угрозу для этих существ и локально понижать общее качество природного резервуара пресной воды. Одним из источников загрязнения озера является разгрузка подземных вод, подверженных влиянию утечек с территорий производственных предприятий, расположенных в прибрежной части. Ярчайшим примером такого объекта является Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат (БЦБК) [Афони́на, 2005; Качество поверхностных вод РФ: ежегодник, 2014; Состояние недр РФ: инф. бюлл., 2021, Колотов, 2021], площадка которого расположена в пределах центральной экологической зоны байкальской природной территории, выделенной в ходе экологического зонирования Институтом географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. На этой территории, согласно закону РФ № 94-РФ от 01.05.1999 «Об охране озера Байкал», хозяйственная деятельность регулируется с целью охраны поверхностных и подземных вод, разгружающихся в озеро. Соответственно, текущее техногенное воздействие, обусловленное производственными процессами на этом участке побережья, должно быть минимизировано, а существующее за счет ранее происходившей деятельности – должно быть устранено. На промплощадке БЦБК загрязнение подземных вод сформировалось за счет поступления в них растворенных химических веществ, кроме того, выявлено специфическое тепловое загрязнение, выраженное в существовании устойчивого ореола сравнительно теплых подземных вод, наличие которых не может быть объяснено сезонным и многолетним ходом естественных температур. На данной территории весьма актуальна проблема реабилитации подземных вод от загрязнения растворенными нефтепродуктами, концентрация которых достигает 17 мг/л, даже после остановки производственной деятельности на предприятии, при этом нефть и нефтепродукты антропогенного происхождения относятся к категории "высокоопасные" для уникальной экологической системы озера Байкал [Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 83...]. Таким образом, анализ сформировавшегося на данном объекте загрязнения подземных вод и оценка возможных способов их реабилитации является актуальной задачей.

Исследования последних десятилетий показывают, что в акваторию озера происходит постоянный приток углеводов природного происхождения [Горшков, 2010, Конторович, 2007, Павлова, 2012, Хлыстов, 2007], при этом их разгрузка часто имеет локализованный характер и связана с тектоническими нарушениями. Одним из примеров таких объектов является разлом Гидратный – значимая региональная структура, изучаемая

большим количеством исследователей, в том числе и в рамках программы Class@Baikal в которой автор принимала участие. Разломная зона представляет собой канал преимущественной миграции флюидов, при этом, наиболее часто фиксируются выходы метана, который является парниковым газом, в связи с чем, оценка его разгрузки по всему разлому является значимой задачей.

Таким образом, анализ техногенных и природных миграционных процессов в подземных водах, разгружающихся в озеро Байкал, относится к актуальным теоретическим проблемам взаимосвязи поверхностных и подземных вод, помогающим решить практические вопросы, связанные с реабилитацией от техногенного загрязнения, а также с оценкой разгрузки парникового газа – метана.

Степень разработанности темы исследования

Научными исследованиями в сфере сохранения озера Байкал занимается Сибирское отделение РАН. Ещё в советское время, под руководством Председателя СО РАН академика В.Н. Коптюга и директора Лимнологического института СО РАН академика М.А. Грачева были разработаны нормы допустимых воздействий на экосистему озера Байкал, в 1996 г. Байкал получил статус Объекта Всемирного наследия, в 1999 г. также, на основе разработок сотрудников СО РАН, был принят Федеральный закон «Об охране озера Байкал».

После остановки производственной деятельности, территория БЦБК представляет собой объект накопленного вреда для окружающей среды, в целом, и для подземных вод, в частности. Характеристике техногенного воздействия на подземные воды и воды Байкала посвящены работы [Галазий и др., 2000; Грачев, 2002; Расторгуев, Куранов, 2002; Горшков и др., 2010; Афонина и др., 2015; Шенькман, 2016; Белозерцева и др. 2018]. Более подробно изучен солзанский полигон, в карты-накопители которого производилось складирование отходов БЦБК [Шенькман, 2017; Богданов и др., 2018; Чебыкин и др., 2020; Родькина и др., 2021; Сутурин и др., 2021; Мамонтов А. А., Мамонтова Е. А, 2025]. При решении задач, связанных с миграцией компонентов в подземных водах, существенное значение имеет изучение дисперсии, ввиду ее особенной роли в формировании ореолов распространения контаминантов (вещества и тепла) в подземных водах [Веригин и др., 1969; Scheidegger, 1961; Бэр и др., 1971; Bear, 1972; Бочеввер и др., 1979; Рошаль, 1981; Куранов, 1984; Лукнер, Шестаков, 1986; Neuman, 1990; Мироненко, Румынин, 2002; Schulze-Makuch, 2005; Лехов, 2010; Никуленков, 2011; Pozdniakov et al., 2021].

Исследования трансформации эндогенных флюидов в Байкальской котловине рассмотрены в работах [Диденков, Проскурякова, 2017; Диденков и др., 2021]. Количественная оценка разгрузки метана для отдельных структур фокусированного выхода

или для всей котловины озера приводится в работах [Granin et al., 2012; Макаров, 2016]. Аналитические расчеты транспорта метана в осадочных толщах с учетом метаногенеза в верхней части донных отложений, на примере другого региона, приводятся в работе [Голдобин, 2012]. Оценка баланса метана в водах озера Байкал приводится в работе [Schmid et al., 2007]. Измерения пространственного распределения парциального давления метана в приповерхностном слое воды и в атмосфере, свидетельствующие о потоке этого газа с поверхности озера Байкал, приведены в работе [Пестунов и др., 2015].

Результаты исследования гидротерм, в том числе и метановых, Байкальской рифтовой зоны перечислены в работе [Ломоносов, 1974], отмечается, что основную роль в их температурном режиме играет тепловой поток из недр, результаты оценки которого опубликованы в работах [Голубев, 1982; Гольмшток, 1997; Голубев 2007; Дучков и др., 2023]. В работе [Голубев 2007] приводятся схемы формирования тепловых аномалий в придонном слое воды в Северной котловине Байкала, обусловленных восходящим движением подземных вод по высокопроницаемым зонам, при этом, автором отмечается возможность аналогичных выходов в Средней и Южной котловинах.

Объект исследований – подземные воды неоген-четвертичного водоносного комплекса, находящиеся под продолжительной существенной техногенной нагрузкой Байкальского целлюлозно-бумажного комбината и подземные воды зоны регионального разлома Гидратный, разгружающиеся в придонной части озера Байкал через систему разлома.

Предмет исследований – потоки тепла и растворенных в подземных водах веществ техногенного и природного происхождения.

Цель и задачи исследования

Тепло- и массоперенос в подземных водах хотя и имеют физически существенно разную природу, формально описываются математически идентичными моделями конвективно-дисперсионного переноса, что позволяет рассмотреть и проанализировать миграцию контаминантов и формирование теплового загрязнения подземных вод в рамках единого модельно-ориентированного подхода. В связи с вышеизложенным, основной **целью** данной **работы** является оценка воздействия на подземные воды и воды озера Байкал химического и теплового загрязнения от техногенных источников и разгрузки природных углеводородов на основе создания унифицированных математических моделей конвективно-дисперсионного переноса для условий прибрежного неоген-четвертичного водоносного комплекса и зоны разлома, как канала миграции углеводородов в озеро.

Для достижения сформулированной цели были решены следующие **задачи**:

— Разработка и обоснование модели тепло- и массопереноса контаминантов в подземных водах неоген-четверичного водоносного комплекса на территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината.

— Определение локализации основных источников контаминантов на территории БЦБК, оценка их интенсивности и динамики формирования ореолов загрязнения от них в подземных водах.

— Разработка и обоснование концептуальной и аналитической модели переноса растворенного метана с подземными водами по разломной зоне в придонной части озера Байкал.

— Оценка разгрузки растворенного метана с подземными водами по разлому Гидратный.

Фактический материал и методы исследования

Диссертационная работа выполнялась с применением современного комплекса исследований, используемого при решении гидрогеологических задач: сбор и анализ опубликованных и фондовых данных; полевые и лабораторные работы, включающие отбор проб и измерение нестабильных характеристик; экстракцию поровых вод, определение концентраций компонентов объемным методом и с помощью спектрофотометрии; обобщение и анализ полученных данных; построение концептуальных моделей миграционных процессов; численное моделирование геофильтрации и геомиграции с применением программного комплекса MODFLOW-2005 и MT3DMS, а также – с помощью самостоятельно разработанного программного кода на языке Python; калибровку моделей и верификацию результатов расчетов по имеющимся фактическим данным; обобщение полученных результатов.

Научная новизна

Впервые разработана модель миграции растворенного метана с подземными водами по разлому Гидратный и оценен вклад субаквальной разгрузки подземных вод как потенциального пути поступления растворенного метана из геологических источников в водную толщу озера.

Разработан модельно-ориентированный подход к совместному анализу теплового и химического загрязнения подземных вод, основанный на унификации математических моделей конвективно-дисперсионного переноса. На его основе впервые построена и верифицирована, с использованием данных многолетнего мониторинга, трехмерная геомиграционная модель, позволившая реконструировать историю формирования химического и теплового загрязнения, а также – идентифицировать устойчивые источники

поступления контаминантов (в частности, растворенных нефтепродуктов) в условиях сложного строения неоген-четвертичного водоносного комплекса в районе БЦБК.

Для территории БЦБК впервые показано, что влияние загрязнения, поступившего на промплощадку, имеет «запаздывающий» характер, так что даже после остановки производственной деятельности комбината, законсервированные в геологической среде первичные очаги контаминантов продолжают питать миграционные ореолы контаминантов, которые разгружаются в донные отложения озера.

Личный вклад

Автор участвовала в составе экспедиции на озере Байкал (Class@Baikal-2018), где проводился пробоотбор донных отложений и воды, измерения нестабильных показателей состава и свойств поровых вод донных отложений. Автор лично проводила обработку фактического материала, создала на его основе геофильтрационную и геомиграционную схемы потока подземных вод в районе площадки БЦБК и разработала на их основе модели геофильтрации и геомиграции, выполнила численное моделирование тепломассопереноса, которое позволило локализовать положение основных источников поступления контаминантов в подземные воды площадки БЦБК. Автором лично разработан и верифицирован программный код на языке Python для аналитических расчетов разгрузки растворенного метана с подземными водами, разгружающимися через зону разлома в придонной части озера Байкал..

Теоретическая и практическая значимость исследования

Разработанная и откалиброванная по данным двадцатилетнего мониторинга распространения контаминантов трехмерная модель тепломассопереноса в подземных водах территории БЦБК позволила локализовать положение основных источников загрязнения, оценить динамику изменения их интенсивности. На основе этой модели выполнены прогнозные расчеты распространения растворенных минеральных веществ и нефтепродуктов для различных сценариев реабилитации от загрязнения. Модель и полученные с ее помощью результаты могут быть использованы для обоснования проекта реабилитационных мероприятий. В рамках калибрации трехмерной модели тепломассопереноса в подземных водах на территории БЦБК установлена существенная роль теплообмена с вышележащими породами зоны аэрации, неучет которого при калибрации модели приводит к завышенному значению параметра продольной термодисперсивности.

Обоснована возможность применения аналитического решения для конвективно-дисперсионного переноса по трещине для оценки разгрузки растворенного вещества по разломной зоне в слабопроницаемых отложениях.

Защищаемые положения:

1. На формирование температурного поля в потоке подземных вод с близким к поверхности залеганием уровня существенное влияние оказывает теплообмен с породами зоны аэрации. Недоучет этого процесса при моделировании значительно завышает расчетный параметр продольной термодисперсивности: для территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината – более чем на порядок, что приводит к некорректным прогнозам распространения теплового загрязнения подземных вод от техногенных источников.

2. Загрязнение подземных вод, сформировавшееся во время работы Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, имеет долговременный инерционный характер в постэксплуатационный период. С помощью разработанной трехмерной модели тепломассопереноса определено положение и интенсивность основных источников загрязнения и доказано, что без реализации защитных мер, содержание растворенных минеральных веществ и нефтепродуктов в подземных водах, разгружающихся в озеро Байкал, будет превышать нормативы более 10 лет.

3. Модель конвективно-дисперсионного переноса по проницаемому каналу с учетом массообмена с окружающими его породами может быть использована для оценки субквальной разгрузки флюидов по разломной зоне. Применение такого подхода на примере сегмента разлома Гидратный позволило оценить разгрузку растворенного метана, расход которой сопоставим с пузырьковыми выходами этого газа на дне озера Байкал.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов основывается на корректном, модельно-ориентированном анализе материалов, полученных в ходе полевых и лабораторных исследований с применением современных, неоднократно апробированных, общепринятых в гидрогеологии подходов обработки полевых данных и моделирования, а также – на использовании специального многократно верифицированного программного обеспечения; на сравнении полученных расчетных результатов с опубликованными материалами работ других авторов; и апробацией основных научных положений на научных семинарах, конференциях и публикациями в рецензируемых научных журналах.

Апробация результатов работы

Основные результаты исследований по работе над темой докладывались на научных семинарах и конференциях в период с 2017 по 2025 гг.; «Моделирование гидрогеологических процессов: от теоретических представлений до решения практических задач (к 90-летию со дня рождения В.М. Шестакова – основателя школы гидрогеодинамики МГУ)» (Москва, 2017 г.); XXIV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов – 2017» (Москва, 2017 г.); VII Международная научно-практическая конференция "Морские исследования и образование – MARESEDU 2018", (Москва, 2018 г.); Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования (Туапсе, 2023 г.); XIX Общероссийская научно-практическая конференция и выставка «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 2024 г.); XIII Международная научно-практическая конференция "Морские исследования и образование – MARESEDU 2024", (Москва, 2024 г.); XXIV Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока, (Екатеринбург, 2024 г.); «Ломоносовские чтения 2024» (Москва, 2024 г.); Научно-практическая конференция «Гидрогеология: прошлое, настоящее и будущее» (Москва, 2024 г.); «VIII Международная геолого-геофизическая конференция и выставка «ГеоЕвразия-2025. Геологоразведочные технологии – наука и бизнес» (Москва, 2025 г.); «Ломоносовские чтения 2025» (Москва, 2025 г.) «VIII Международная Верещагинская Байкальская Конференция» (Иркутск, 2025 г.).

Публикации автора по теме диссертации изложены в 6 работах, из которых 4 статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа изложена на 132 страницах текста, состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы из 157 наименований, включает 64 рисунка, 16 таблиц.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю – Расторгуеву Александру Владилиновичу за многолетний труд по руководству этой работой, поддержку и помощь в подготовке работы.

Также автор благодарит коллектив сотрудников кафедры гидрогеологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова за значимые комментарии

и дискуссии в процессе выполнения работы и подготовке к ее защите, особенно автор признателен Позднякову С.П., а также Казак Е.С. и Маслову А.А.

За непосредственное знакомство с озером Байкал и бесценный опыт полевых исследований автор выражает благодарность всем участникам экспедиции «Class@Baikal 2018» под руководством Хлыстова О.М. и Ахманова Г.Г., особенно Видищевой О.Н., Деленгову М.Т. и Соловьевой М.А. за совместную работу и ценные дискуссии.

Отдельную благодарность автор выражает Лехову В.А., Картунову Е.В., Кузнецову К.М., Волковой М.К. и Костериной Ю.В. за бесценную поддержку и консультации в процессе подготовки работы. Автор также весьма признателен своей семье за понимание и поддержку на протяжении работы над диссертацией.

Глава 1. Характеристика природных и техногенных условий в изучаемом районе

Одним самых значимых источников поступления техногенных веществ в воды озера Байкал является Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат (БЦБК) [Афони́на, 2005; Качество поверхностных вод РФ: ежегодник, 2014; Состояние недр РФ: инф. бюлл., 2021]. В подземных водах на территории БЦБК выявлено наличие существенного количества различных техногенных растворенных веществ, которое можно интегрально охарактеризовать условно консервативным показателем минерализации, также отмечается термальное загрязнение, которое отчетливо зафиксировано в процессе измерения температуры воды в скважинах, соответственно, особый интерес представляет исследование процессов массопереноса и теплопереноса в водовмещающих отложениях на одном объекте. Также в подземных водах площадки предприятия наблюдается значительное содержание растворенных нефтепродуктов.

1.1. Природные условия

1.1.1. Физико-географический очерк

Участок исследований расположен на южном побережье озера Байкал в Слюдянском районе Иркутской области, в 1,5 км восточнее жилых районов г. Байкальска (Рис. 1.1). Рассматриваемая территория представляет собой слабонаклонную равнину, расположенную на южной оконечности Байкальской впадины в пределах предгорной Утуликской впадины представляющей собой наклонную предгорную равнину, осложненную в прибрежной части пролювиальными конусами выноса по долинам рек Утулик и Солзан.

Изучаемый участок располагается в зоне умеренного континентального климата с продолжительной и холодной зимой и коротким теплым летом. В окрестностях Байкальска, из-за близости озера Байкал, климат более мягкий, чем в отдаленных от озера районах. Зимы здесь менее морозные, а летние месяцы не очень жаркие, с обилием осадков. Осень и весна наступают позже. Первые заморозки фиксируются только в конце сентября, последние — в третьей декаде мая. Летом среднемесячная температура воздуха составляет в пределах 12–15 °С в июне, 15–18 °С в июле, и 12–16 °С в августе. Зимние температуры изменяются в пределах от –20 °С до –10 °С. Диаграмма среднемесячных температур за период 2005-2024 гг. для метеостанции г. Байкальска приведена на Рис. 1.2, можно отметить, что самым жарким месяцем является июль, самым холодным — февраль. Среднегодовая температура воздуха составляет 0,9 °С.

В изучаемом районе отсутствуют многолетнемерзлые породы [Пиннекер и др., 1968]. В работе [Лешиков, 1978] опубликованы данные Гидрометеослужбы о средней годовой температуре грунтов сезонномерзлого слоя для населенных пунктов побережья озера Байкал – Слюдянка (33 км на запад-северо-запад от Байкальска) и Выдрино (34 км на восток-юго-восток от Байкальска). Так, в Слюдянке, средняя годовая температура поверхности земли составляет $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а средняя годовая температура грунтов сезонномерзлого слоя $3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. В Выдрино средняя годовая температура поверхности земли составляет $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, а средняя годовая температура грунтов сезонномерзлого слоя $5,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Глубина сезонного промерзания на период 2015 г составила 2,0-2,2 м, расчетная глубина сезонного промерзания составляет 3,27 м.

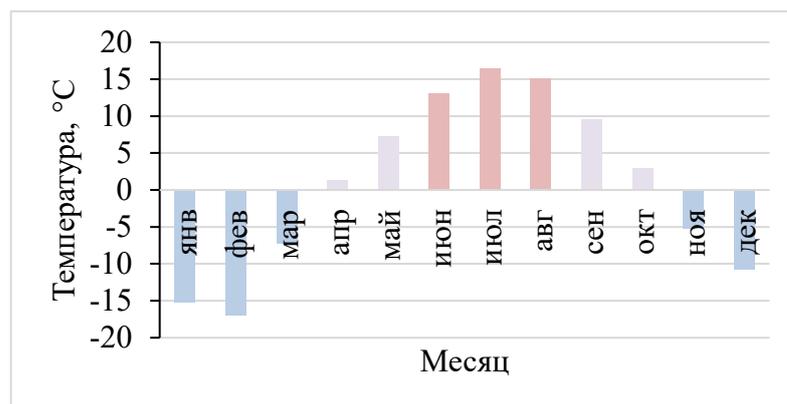


Рисунок 1.2 – Диаграмма среднемесячных температур за период 2005-2024 гг. в районе г. Байкальска

Из-за близости горного массива Хамар-Дабан средняя величина выпадающих за год осадков в районе Байкальска достигает 770 мм, из этого количества на май-август приходится около 65 %. Испаряемость примерно 400 мм/год [Технический отчет «Инженерно-экологические изыскания», 2013]. Многолетняя динамика суммарного

количества осадков приведена на Рис. 1.3, можно отметить, что диапазон изменения среднегодового количества осадков существенно сократился после 2000 года.

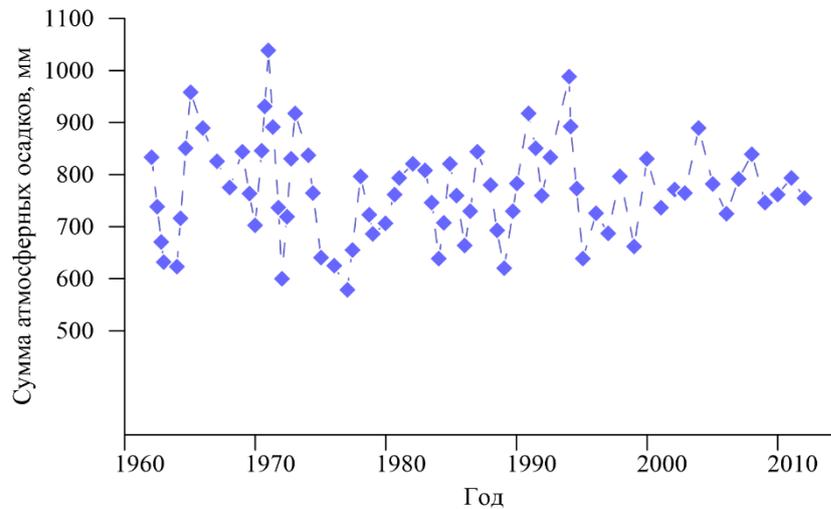


Рисунок 1.3 – Диаграмма суммарного количества осадков в районе г. Байкальска

1.1.2. Гидрологические условия

Территория расположена на участке южного побережья озера Байкал, включает бассейны рек Солзан, Большая Осиновка и нескольких ручьев, формирующихся в северных отрогах хребта Хамар-Дабан. Все реки относятся к бассейну озера Байкал. Характеристика водотоков будет приведена согласно материалам [Технический отчет «Инженерно-экологические изыскания», 2013].

Для годового режима водотоков изучаемого района характерно наличие половодья и паводков и замерзание в зимний период. Основная часть стока проходит в теплый период года (70-90 %). Объемы стока дождевых паводков (60-65 % от общего годового стока) превосходят объемы половодья. Половодье обычно проходит с середины апреля до середины июня. Среди источников питания рек главную роль играет дождевое, которое составляет примерно 50 % от общего поступления воды в русловую сеть. Кроме того, значительная часть дождевого стока переводится в подземные воды в результате фильтрации в аллювиальных отложениях, распространенных в исследуемом районе.

Река Солзан берет начало на высоте 1800 м. Русло реки извилистое и ниже впадения р. Чернушки становится разветвленным. После выхода из гор р. Солзан течет по сравнительно ровной поверхности древнего конуса выноса и образует невысокие поймы (до 2 м), на которых наблюдаются следы старых русел. В современном русле реки присутствуют многочисленные аккумулятивные острова (длина 0,6-1,2 км), покрытые древесной и кустарниковой растительностью.

Река Большая Осиновка берет начало на высоте около 1600 м. При выходе на предгорную территорию извилистость реки повышается и появляется разветвленность. Ширина реки увеличивается до 15-20 м. В русле нижнего течения Большой Осиновки наблюдаются острова, поросшие смешанным лесом. Долина реки на всем протяжении залесена.

Химический состав вод рек территории формируется в однородных физико-географических условиях, в основном, под влиянием слабовыщелачиваемых изверженных и метаморфических пород архея и протерозоя, что определяет сходство гидрохимического состава поверхностных вод бассейна озера по соотношению ионов, а также их принадлежность к первому типу гидрокарбонатно-кальциевых вод и низкую общую минерализацию. Минерализация вод ниже, чем байкальской воды, ее величина колеблется в летний период в пределах 40-80 мг/л, в зимний повышается до 100 мг/л. Максимум минерализации наблюдается в феврале-апреле, минимум – в мае-июне. Реки, формирующиеся на водосборной площади северных отрогов хребта Хамар-Дабан, находятся под воздействием промышленных объектов Ангаро-Черемховского промышленного комплекса и Байкальского целлюлозно-бумажного комбината ввиду их существенного воздействия на атмосферные осадки и, соответственно, на речной сток.

Характерным загрязняющим веществом, присутствующим во всех реках района, являются нефтепродукты. За период 1998-2000 гг. средние концентрации превышали норму в 1,2-1,4 раза, максимальные превосходили ПДК в 2,8-3,8 раз с наибольшим значением в р. Солзан.

Озеро Байкал – крупнейший, в мировом масштабе, резервуар пресных вод (23,6 тыс. км³ [De Batist et al., 2002] – более 20% мировых запасов), а также – уникальный биогеоценоз с большим количеством эндемичных организмов. Водосборный бассейн озера составляет территорию площадью 588 тыс. км², из которых 240,5 тыс. км² находятся на территории России. В Байкал впадает более 500 водотоков, при этом, на реку Селенгу приходится примерно половина всего объема притока [Фролова и др., 2017; Алексеев Л.П. и др., 2019].

В среднем многолетнем водном балансе озера Байкал приходная часть представлена [Гос. доклад «О состоянии оз. Байкал ...», 2022]:

- притоком поверхностных вод (57,77 км³ в год – 82,4 % приходной части);
- осадками (9,26 км³ – 13,2 %);
- притоком подземных вод (3,12 км³ – 4,4 %).

Составляющими расходной части баланса являются:

- сток из озера Байкал поверхностных вод – р. Ангара ($60,89 \text{ км}^3$ – 86,8 % расходной части);
- испарение ($9,26 \text{ км}^3$ – 13,2 %).

В питании озера и большинства его притоков значительную долю (13–18 %) составляют атмосферные осадки, что определяет крайне низкую минерализацию его вод. Байкальская вода существенно выделяется среди многих пресноводных водоемов по показателю минерализации, который составляет около 0,1 г/л, также в воде озера довольно высокое содержание растворенного кислорода – до 14 мг/л. Такие характеристики обусловлены составом пород, слагающих водосборный бассейн озера, которые, преимущественно, кристаллические слабо растворимые. Также определенную роль, по-видимому, играет температурный режим местности – в целом, невысокие температуры воздуха и вод самого озера ингибируют множество процессов деструкции химических соединений, а также обуславливают повышенную растворимость кислорода в водах озера. Также чистоту байкальской воды обеспечивает большое количество живых организмов-фильтраторов (губки, рачки). Средние содержания макрокомпонентов состава воды приведены в Таблице 1.1. Важно отметить, что воды, поступающие с притоками в котловину озера подвержены в ней значительной трансформации, примером такого процесса может служить извлечение кремния диатомовыми водорослями в процессе их жизнедеятельности и последующее накопление диатомовых илов, состоящих из их панцирей [Ветров, Кузнецова, 1997].

С точки зрения распространения загрязнения в водах озера, важно отметить, что проточность озера невелика, в основном переток водных масс идет из северной котловины в центральную, а затем – в южную, которая имеет сток в реку Ангару. Но при этом, процесс вертикального обмена между всеми слоями внутри котловин на порядок более активен и время замены глубинных вод приповерхностными составляет 11 лет и более [Ветров, Кузнецова, 1997], что весьма быстро в геологическом масштабе времени.

Уровень воды в озере зависит не только от соотношения выпавших в его водосборном бассейне осадков и притока поверхностных и подземных вод, испарения и стока р. Ангары, но и от режима эксплуатации Иркутской ГЭС. Годовой ход уровня озера Байкал в условиях подпора в целом сохранился близким к естественному режиму. Зарегулированность проявилась в увеличении амплитуды колебаний уровня (от 80 до 113 см) и сдвиге в сторону запаздывания сроков наступления наибольшей сработки и наполнения водоема. Годовой ход уровня на озере Байкал обычно характеризуется плавным повышением до отметок близких к нормальному подпорному уровню (в мае – сентябре),

стабилизацией максимальных уровней в октябре и непрерывным понижением с ноября по апрель [Гос. доклад «О состоянии оз. Байкал ...», 2022].

Период, который воспроизводился на последующих модельных расчетах – с 2002 года по 2022 год. В этот промежуток времени уровень Байкала менялся согласно графику (Рис. 1.4), средний абсолютный уровень озера за рассматриваемый период длительностью 20 лет, равен 455,36 м.

Результаты батиметрической съемки прибрежной акватории оз. Байкал в устье р. Бол. Осиновка показали, что, в целом, на расстоянии 300 м от уреза воды, глубина озера составляет 50 м, при рабочем уровне 455,60 м абс. [Технический отчет «Инженерно-экологические изыскания», 2013].

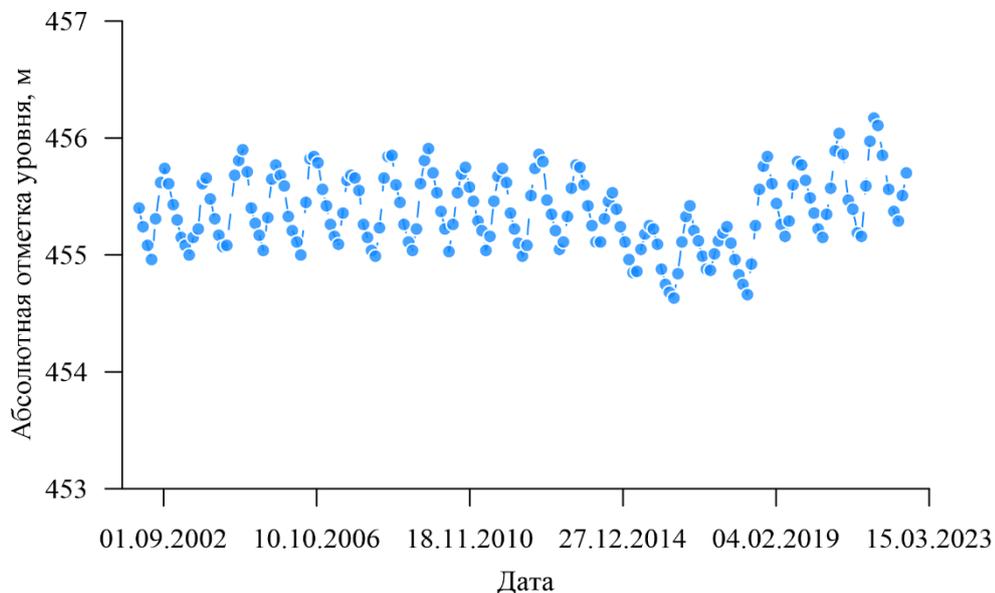


Рисунок 1.4 – Уровень оз. Байкал по данным поста порт Байкал

Температура воды летом в открытом озере +12-14 °С, при этом она понижается с глубиной и достигает среднегодовых значений $+3,3 \pm 0,2$ °С для придонного слоя воды на глубинах более 300 м и довольно стабильна [Дучков, 2003].

Отложения, формирующие дно озера, разнообразны и закономерно соответствуют составу горных пород, слагающих побережье. Литораль преимущественно сложена галечными и песчаными породами, с глубин более 20 метров преобладают пелитовые отложения, фото образца глубоководных отложений представлено на Рис 3.3.

Таблица 1.1 – Средние значения концентраций макрокомпонентов состава воды в озере Байкал [Домышева и др., 2019]

Место	Концентрация, мг/дм ³							Сумма макрокомпонентов
	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	
Южный Байкал	65,04	5,36	0,47	16,01	3,03	3,36	0,96	94,23
Средний Байкал	65,26	5,34	0,46	16,01	3,04	3,36	0,96	94,43
Северный Байкал	64,82	5,31	0,46	16,04	3,03	3,35	0,95	93,96

1.1.3. Геологическое строение

В региональном строении изучаемой территории выделяются две крупные геологические структуры: докембрийская Сибирская платформа и палеозойский Саяно-Байкальский складчатый пояс, разделенные системой разломов. Изучаемый участок, расположенный на юго-западном побережье, относится к Хамардабанскому террейну, являющемуся частью Центрально-Азиатского складчатого пояса [Бухаров и др., 2008, Байкаловедение], перекрытому кайнозойскими осадками. Хамардабанский террейн представлен осадочными и вулканогенно-осадочными образованиями. Неоген-четвертичные отложения большой мощности залегают в пределах предгорной впадины длиной 18 км и шириной 3-5 км между акваторией озера Байкал и отрогами хребта Хамар-Дабан (Рис. 1.5) [Макаров, 2016]. Отложения сформированы аллювиальными, аллювиально-пролювиальными осадками четвертичного и неоген-четвертичного возраста. Мощность рыхлых отложений от нескольких десятков до сотен метров [Шенькман, 2016]. Южнее впадина переходит в отроги хребта Хамар-Дабан, сложенного архейскими метаморфическими образованиями.

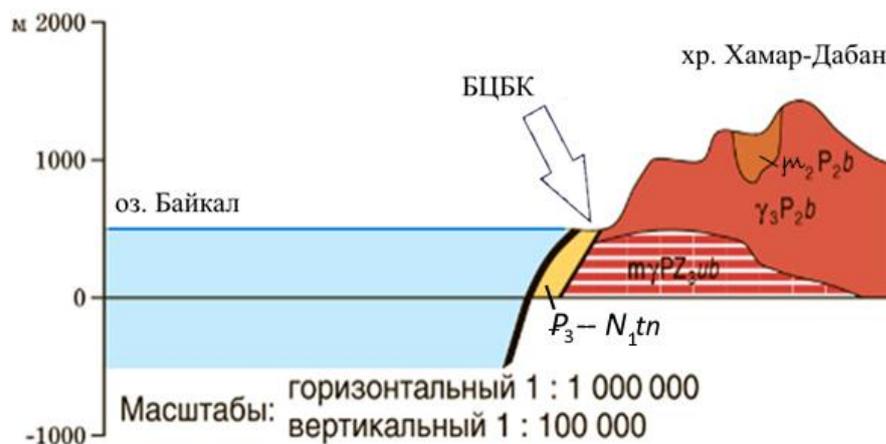


Рисунок 1.5 – Схематический региональный разрез (переработано из Гос. геол. Карта РФ масштаб 1 : 1 000 000 лист М-48 (Улан-Удэ))

В прибрежной части южного Прибайкалья отмечается повышенный тепловой поток (от 60–70 мВт/м² в районе г. Байкальска до 170 мВт/м² в г. Слюдянка [Голубев, 2007]), а также наличие значительных сейсмодислокаций и следов сейсмической активности региона.

В диссертационной работе [Макаров, 2016] территория города Байкальска и, соответственно, БЦБК относится к структуре Утуликской впадины или депрессии на которой развит абразионно-аккумулятивный рельеф байкальских террас и эрозионно-аккумулятивный рельеф речных террас (Рис. 1.6). Описанная мощность отложений первой байкальской террасы достигает ~100 м, в плане она распространена на протяжении всей впадины, достигает ширины 1,6 км. Поверхность террасы относительно ровная, имеет небольшой уклон в сторону Байкала, прорезана эрозионно-аккумулятивными долинами рек Утулик, Харлахта, Солзан. В разрезе отложений террасы выделяется мощный прослой супесей и песков (~65 м), гравийно-галечные отложения с прослоями песков и суглинков (~30 м), верхняя часть разреза представлена преимущественно грубообломочным материалом (валунно-галечниковые отложения с прослоями песка и гравия), общая мощность отложений в работе [Макаров, 2016] не сообщается, однако, по данным изысканий [Отчетная документация по инженерным изысканиям, 2021], максимальная вскрытая мощность верхней пачки, представленной валунно-галечниковыми отложениями с песчаным заполнителем, достигает 13,5 метров в скважинах 3076 и 3077, расположенных в центральной части изучаемой территории, между главным корпусом БЦБК и ТЭЦ (и, соответственно, в центральной части первой байкальской террасы). Отмечается закономерность в размерности отложений – вниз по разрезу она уменьшается, как и состав заполнителя, что говорит о возможности формирования верхней части разреза за счет переотложения селевых наносов [Макаров, 2016]. На территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината вскрытая мощность рыхлых неоген-четвертичных отложений – 70 м (скв. 2009, расположена около главного корпуса БЦБК, [Заключение по результатам обследования..., 2020], до этих глубин не выявлены выдержанные слабопроницаемые отложения [Шенькман, 2016].

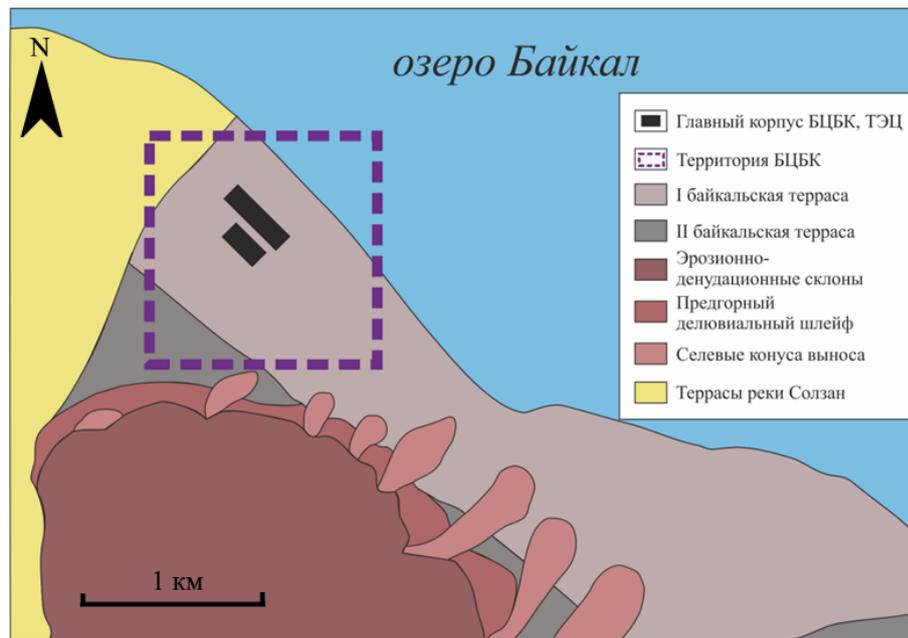


Рисунок 1.6 – Схема зонирования генетических типов четвертичных отложений [Макаров, 2016]

1.1.4. Гидрогеологические условия

В гидрогеологическом отношении рассматриваемая территория относится к Байкальской складчатой области, осложненной рядом межгорных артезианских бассейнов, а также Байкальским межгорным субаквальным артезианским бассейном (с чехлом, сложенным рыхлыми кайнозойскими отложениями, мощностью около 9 км, под водами озера Байкал). В пределах выделенной структуры преобладают воды в трещиноватых кристаллических породах и в рыхлых кайнозойских отложениях. Согласно районированию, представленному на схематической гидрогеологической карте [Петров, Яковлев, 2023], верхний гидрогеохимический этаж исследуемого участка относится к гидрогеохимическому району пресных вод, нижний гидрогеохимический этаж также относится к району пресных вод.

На всей территории исследования первым от поверхности регионально распространенным является водоносный комплекс неоген-четвертичных отложений, водовмещающими породами являются плохо отсортированные гравийно-галечниковые и валунно-галечниковые отложения с включением линз и прослоев песчаного, супесчаного и иногда суглинистого состава. Мощность комплекса, согласно литературным данным [Шенькман, 2016], достигает сотен метров. В плане горизонт представляет ограниченную область (приуроченную к Утуликской впадине) шириной до 3,7 км между отрогами хребта Хамар-Дабан и озером Байкал.

Питание осуществляется, в основном, за счет инфильтрации атмосферных осадков, основная часть разгрузки происходит в озеро Байкал.

Подземные воды данного горизонта по химическому составу гидрокарбонатные кальциево-натриевые, с минерализацией до 0,2 г/л [Пиннекер и др., 1968].

В процессе инженерно-геологических изысканий, выполненных в 2021 году, было проведено бурение 12 скважин, а также комплекс опытно-фильтрационных работ, результаты которого представлены в отчете [Отчетная документация по инженерным изысканиям, 2021]. В ходе бурения производились поинтервальные работы (откачка в течение 90 минут) для установления изменчивости фильтрационных параметров с глубиной, однако в ходе обработки данных экспериментов, не удалось выявить закономерности изменения фильтрационных параметров с глубиной. Также, во время проходки новых скважин, производился поинтервальный отбор проб, позволивший изучить профиль распределения загрязнения подземных вод, который приведен в следующем разделе текста работы. Опытные фильтрационные работы в уже существующих скважинах (1001, 1002, 1003, 1005) показали близкий к более ранним определениям (в 1999 году) диапазон фильтрационных свойств, при этом, более низкие значения, полученные при более позднем опробовании, можно связать с кольматацией скважин, сопоставление приведено в Таблице 1.2.

В работе [Расторгуев, Куранов, 2002] было произведено моделирование опыта работы перехватывающего дренажа (групповой откачки) на площадке БЦБК, которое показало удовлетворительное совпадение модельных и наблюдаемых значений уровней подземных вод при следующих фильтрационных параметрах – коэффициент фильтрации 34 м/сут, водоотдача 0,25, что, в целом, не противоречит характерным значениям для данного типа пород (песчаные и гравийно-галечниковые отложения), а также входит в диапазон ранее полученных данных опытно-фильтрационных работ (1999 и 2021 годов). Также в опубликованных в работе [Лещиков, 1978] свойствах для песков мелко- и разнозернистого состава озерного и озерно-аллювиального генезиса юго-восточного побережья Байкала (по данным Института земной коры СО РАН СССР, Иркутского геологического управления) определены следующие диапазоны значений коэффициента фильтрации – 1-3 м/сут, 15-50 м/сут и 100-160 м/сут.

В процессе изысканий, проведенных в 2022 году, был произведен единовременный замер уровней во всех доступных скважинах, по результатам которого, с помощью интерполяции методом кригинга, была построена схема (Рис. 1.7) абсолютных отметок уровней неоген-четвертичного водоносного комплекса.

Таблица 1.2 – Сравнение фильтрационных параметров по материалам 1999 г и 2021 г.

Номер скважины	Глубина, м	Коэффициент фильтрации, м/сут	
		1999 г.	2021 г.
1001	14	39	39,3
1002	14	46	25,3
1003	14	10	3,5
1004	14		14,5
1005	18,5	12,3	8,9

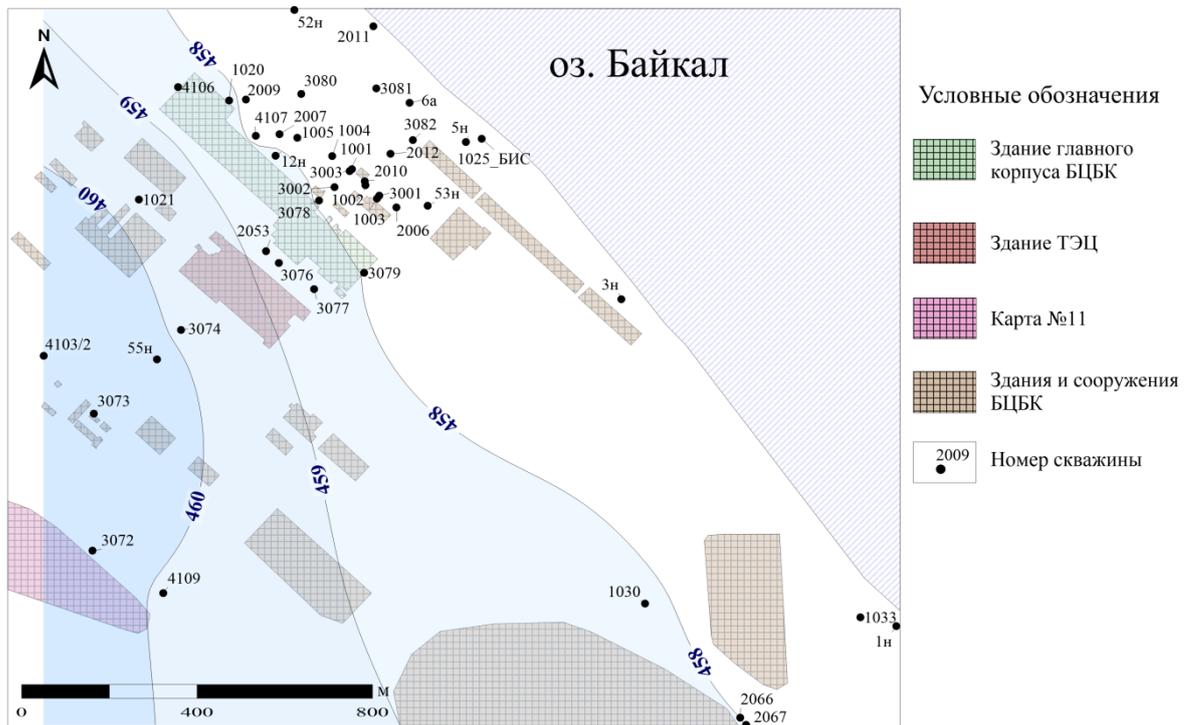


Рисунок 1.7 – Схема абсолютных отметок уровней неоген-четвертичного водоносного комплекса по данным единовременного замера в августе 2022 г.

1.2. Техногенные условия

Техногенные источники поступления загрязнения, в том числе и углеводородного, распределены по всему побережью и представлены Байкальским целлюлозно-бумажным комбинатом (БЦБК) с полигонами складирования его отходов, обеспечивающие основную часть загрязнений, Слюдянский промышленный узел, поселки Выдрино, Култук, Ангасолка. В связи с загрязнением Байкальского региона, также следует упомянуть территории, находящиеся под воздействием промышленного узла и ИТЭЦ-11 в г. Усолье-Сибирское вблизи реки Ангара [Паутов, 2002]. По данным, приведенным в работе [Афоница, 2005], главные участки потока углеводородных соединений и органических веществ приурочены к Улан-Удэнскому промышленному комплексу, с очистных

сооружений которого в р. Селенгу поступает около 50% от общего количества поступлений со всех очистных сооружений предприятий, которые расположены в бассейне оз. Байкал (вклад этого источника идет в сток реки Селенги), Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат (БЦБК) 25,6% и Северобайкальский промышленный узел – около 5%. Вклад Иркутско-Черемховского и Южно-Байкальского промышленных узлов в загрязнение юго-западного побережья озера Байкал отмечается в работе [Янчук, 2016]. Многие исследователи подчеркивают существенную роль БЦБК в загрязнении вод озера Байкал растворенными нефтепродуктами, например, в работе [Афони́на, 2005] приводятся данные, что в период ледостава, высокие концентрации углеводородов в поверхностном слое прослеживаются на расстоянии 25 км на северо-восток и в 15 км на северо-запад от выпуска сточных вод. Однако реальный вклад этого источника в поступление контаминантов в акваторию трудно оценить, ввиду значительной их разгрузки с потоком подземных вод непосредственно в воды озера, где происходит быстрое существенное разбавление стоков. Также определенная сложность оценки поступающего загрязнения органическими веществами и углеводородными соединениями с БЦБК обусловлена тем, что значительная его часть поступает в виде слаборастворимых взвесей (лигнин, целлюлоза, битумы, смолы), которые накапливаются в толще донных отложений [Афони́на, 2005]. Ввиду особенной роли БЦБК в поступлении контаминантов в воды озера Байкал, отмечаемой многими исследователями, изучение загрязнения, поступающего с его территории, является основной целью этой работы.

Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат

Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат (БЦБК) расположен на юго-западном побережье озера Байкал в Слюдянском районе Иркутской области, в 1,5 км восточнее жилых районов г. Байкальска (Рис. 1.1). Предприятие было построено в 1966 г. и являлось градообразующим, обеспечивая город электроэнергией и теплом, горячей и холодной водой. Основным видом выпускаемой товарной продукции являлась сульфатная хвойная целлюлоза, побочной продукцией были скипидар-сырец, талловое масло, оберточная бумага и картон.

Проектирование комбината было выполнено согласно технологии получения целлюлозы из древесины хвойных пород методом сульфатной варки. Процесс производства основывается на химической обработке растительного сырья, для отделения целлюлозы от других содержащихся в растительной ткани веществ – лигнина, гемицеллюлоз, смол, жиров, танинов и других [Сморозин и др., 2010].

Производственный цикл включал этап варки щепы в котлах при температуре 170-180°C, применение Na_2S , Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , NaOH , NaClO_3 , ClO_2 , SO_2 , соответственно,

нагретые воды, реагенты, а также их производные, вместе с отделенными от древесины веществами (например, лигнином), можно ожидать в качестве контаминантов природной среды, в том числе, и подземных вод. Регенерация химикатов, применяемых при получении целлюлозы, осуществлялась в содорегенерационном отделе ТЭЦ [Сморозин и др., 2010], которая также расположена в пределах площадки БЦБК, и на ней применялись несколько основных видов топлива – бурый уголь, кородревесные отходы, а также – мазут для растопки [Заключение по результатам обследования..., 2020].

Глубокая очистка производственных сточных вод и хозяйственно-бытовых стоков осуществлялась в цеху очистных сооружений БЦБК. После биологической, химической очистки, минуя пруды-отстойники, пруд-аэратор и рассеивающий выпуск, сточные воды сбрасывались в озеро Байкал, однако в 2008 году, в связи с созданием замкнутой системы водопользования на предприятии, хозяйственно-бытовые сточные воды города Байкальска и БЦБК были выделены в самостоятельный поток с очисткой на новых очистных сооружениях города Байкальска. Отходы сжигания угля, коры, черного щелока, шлам-лигнина и избыточного активного ила удалялись в карту №11 и далее по пульпопроводу в карты Бабхинского и Солзанского полигонов.

С точки зрения дальнейших работ по установлению источников поступления контаминантов в подземные воды, важно также упомянуть, что на территории предприятия существует разветвленная сеть водоснабжения (источником воды, для которой являются обеззараженные воды из озера Байкал), предназначенная для хозяйственно-питьевого, противопожарного, производственного водоснабжения. Согласно материалам [Заключение по результатам обследования..., 2020], водопроводные сети находятся в неудовлетворительном состоянии, значительное количество воды сбрасывается в грунт через свищи, обеспечивая повышенный уровень техногенной инфильтрации, а также возникновение сырых и заболоченных мест в створах трубопроводов.

Также на территории предприятия существуют канализационные сети: производственные, бытовые, дождевые. Производственный цикл предприятия включал применение агрессивных веществ, которые попадали в сеть производственной канализации, приводя к её коррозии и износу, степень которого неизвестна. Сокращение стоков привело к осаждению механических примесей, возникновению засоров. Сети ливневой канализации не функционируют [Заключение по результатам обследования..., 2020].

К сети существующих (и существовавших) коммуникаций предприятия относятся также трубопроводы, ранее задействованные в технологических процессах основного производства, связывавшие производственные циклы комбината. Оставшиеся подземные

коммуникации не проходили регулярной проверки технического состояния и обслуживания, их техническое состояние неизвестно, в связи с транспортировкой по ним агрессивных реагентов, применявшихся в технологических процессах, можно предположить, что часть системы трубопроводов разрушена. Основные технологические линии главного технологического цикла расположены между главным корпусом и выпарным цехом ТЭЦ [Заключение по результатам обследования..., 2020].

За период функционирования предприятия происходило изменение технологии производства для сокращения негативного воздействия на окружающую среду, но, несмотря на это, в феврале 2013 г. правительство Российской Федерации приняло решение об остановке производственной деятельности предприятия. В сентябре 2013 г. из-за отсутствия сырья и химикатов предприятие было остановлено.

Следует отметить, что одним из мероприятий, направленных на снижение распространения загрязнения в подземных водах и сокращения их последующей разгрузки в озеро Байкал, было введение в эксплуатацию перехватывающего водозабора. В 1992-1994 гг. был сооружен водозабор из 6 скважин глубиной 20-25 м, который был малоэффективен [Результаты эколого-гидрогеологических работ..., 1999]. В 2002 г. действовали уже 8 скважин (Рис. 1.8) глубиной 35-70 м с производительностью, достигающей 3,4 тыс. м³/сут, однако ожидаемый эффект полного перехвата загрязненных подземных вод не был достигнут. Тогда, для оптимизации работы откачивающих скважин, силами ЗАО «ДАРВОДГЕО» был выполнен анализ опыта эксплуатации дренажа, который выявил недостаточность дебита и количества перехватывающих скважин, и, соответственно, были предложены мероприятия по его усовершенствованию [Расторгуев, Куранов, 2002]. Однако разработанный проект не был реализован, БЦБК закрылся в 2013 году, а в 2014 г. был остановлен перехватывающий водозабор, соответственно, распространение загрязнения продолжилось с естественным потоком подземных вод в сторону озера.



Рисунок 1.8 – Схема расположения скважин перехватывающего водозабора, функционирующего с 2002 г. по 2014 г. на территории БЦБК

На данный момент, Министерство природных ресурсов и экологии РФ, для предупреждения угрозы загрязнения озера Байкал отходами, образовавшимися в процессе деятельности «Байкальского целлюлозно-бумажного комбината», в рамках федерального проекта «Сохранение озера Байкал», входящего в состав национального проекта «Экология», осуществляет работы по выявлению и оценке ОНВОС (объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду) на земельных участках, на которых в прошлом осуществлялась экономическая деятельность ОАО «БЦБК», и организацию работ по ликвидации накопленного вреда окружающей среде на указанных земельных участках (Постановление № 1834).

Характеристика наблюдательной сети

Изначально (с 1972 года) наблюдения за составом подземных вод производились специализированным подразделением БЦБК в скважинах глубиной 10-20 м, однако в 1979 году служба по ведению мониторинга была упразднена, наблюдения проводились различными организациями «Иркутскгеология», ВостСибТИСИЗ, «Сосновгеология» и некоторыми другими [Заключение по результатам обследования..., 2020].

Данные опробования, на которых основано исследование, представлены двумя группами: первая – представляет собой результаты опробования скважин перехватывающего водозабора (8 шт.), который функционировал более 10 лет; вторая –

результаты опробования скважин наблюдательной сети (16 шт.). Основной массив данных по содержанию растворенных веществ в подземных водах получен при опробовании первой группы скважин в процессе постояннодействующего водоотбора. Эти скважины глубиной от 35 до 70 м, обсажены металлическими трубами, выходящими на поверхность, оборудованы щелевыми фильтрами со скважностью 10-15% на глубинах 5,0-46,8 м. Скважины второй группы опробовались существенно реже, с предварительной прокачкой. Глубины скважин этой группы, в основном, около 20 м, скважины обсажены металлическими трубами, выходящими на поверхность, оборудованы щелевыми фильтрами со скважностью 5-8% на глубинах 10-23 м.

Наиболее современные данные опробования относятся к 2021-2022 годам, получены в ходе проходки новых скважин до глубин 50 м с поинтервальным опробованием подземных вод в процессе бурения. Отбор проб вод для лабораторных анализов проводился в соответствии с требованиями ГОСТ 31861-2012 и ГОСТ 31942-2012, также учитывались дополнительные требования аналитических лабораторий к отбору проб, с учетом планируемых анализов. Перед отбором проб воды проводилась предварительная прокачка скважин. Для отбора проб применялся ручной скважинный пробоотборник из нержавеющей стали, объемом 1 дм³.

Важно отметить, что имеющийся массив данных о результатах опробования подземных вод характеризуется временной и площадной нерегулярностью, а перечень определяемых показателей часто изменялся и был недостаточно полным, как минимум потому, что макрокомпоненты состава подземных вод полностью не представлены.

Характеристика загрязнения

Несмотря на комплекс мер, принятых для сокращения воздействия производства на окружающую среду, в целом, и на подземные воды, в частности, – контаминация подземных вод произошла в первые десятилетия функционирования предприятия и продолжается в настоящее время. Гидрогеологические исследования Ангарской геологической экспедиции позволили установить факт загрязнения подземных вод в районе БЦБК еще в 1980-х годах, которое, ввиду несовершенства наблюдательной сети, фиксировалось только до глубины 25 м. Далее, в 1999 г. были сооружены новые скважины с глубинами 50-70 м, в которых было проведено опробование, показавшее, что антропогенное воздействие на подземные воды происходит до глубин 50 м, при этом, наиболее интенсивное влияние наблюдалось до глубин 30 м.

Согласно докладу [Гос. доклад «О состоянии оз. Байкал ...», 2013], за период своего функционирования БЦБК оказывал существенное влияние на акваторию озера, сравнимое с нагрузкой от такого крупного промышленного центра как г. Улан-Удэ (Табл. 1.3, Рис. 1.9).

Таблица 1.3 – Характеристика основных источников загрязнения окружающей среды в крупных городах Байкальской природной территории [Гос. доклад «О состоянии оз. Байкал ...», 2022]

	Год									
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
	Сбросы в поверхностные водные объекты, млн м ³									
г. Байкальск	20,5	1,8	1,7	1,6	1,3	1,3	1,6	1,9	2,1	
г. Слюдянка	1,3	1,2	1,1	0,9	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7	
г. Северобайкальск	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1	
г. Улан-Удэ	25,4	22,2	22,1	21,7	20,6	20,5	19,5	18,7	19,3	
г. Гусиноозерск	401,5	403,5	427,9	432,8	491,3	437,7	374,8	355,7	415,7	
Всего	449,5	429,5	453,7	457,8	515,1	461,4	397,5	378,0	438,8	

В работе [Ветров, Кузнецова, 1997] приводятся данные по компонентам сточных вод на начальном этапе функционирования БЦБК (1978-1980 гг), отмечается, что основной вклад в минеральный состав стоков осуществляется за счет ионов гидрокарбоната, сульфата, натрия и хлорида, при этом превышения среднего содержания хлоридов в сточных водах над средними концентрациями его же в водах озера наиболее значительно (из имеющихся данных) – 230 раз, сульфата – 55 раз.

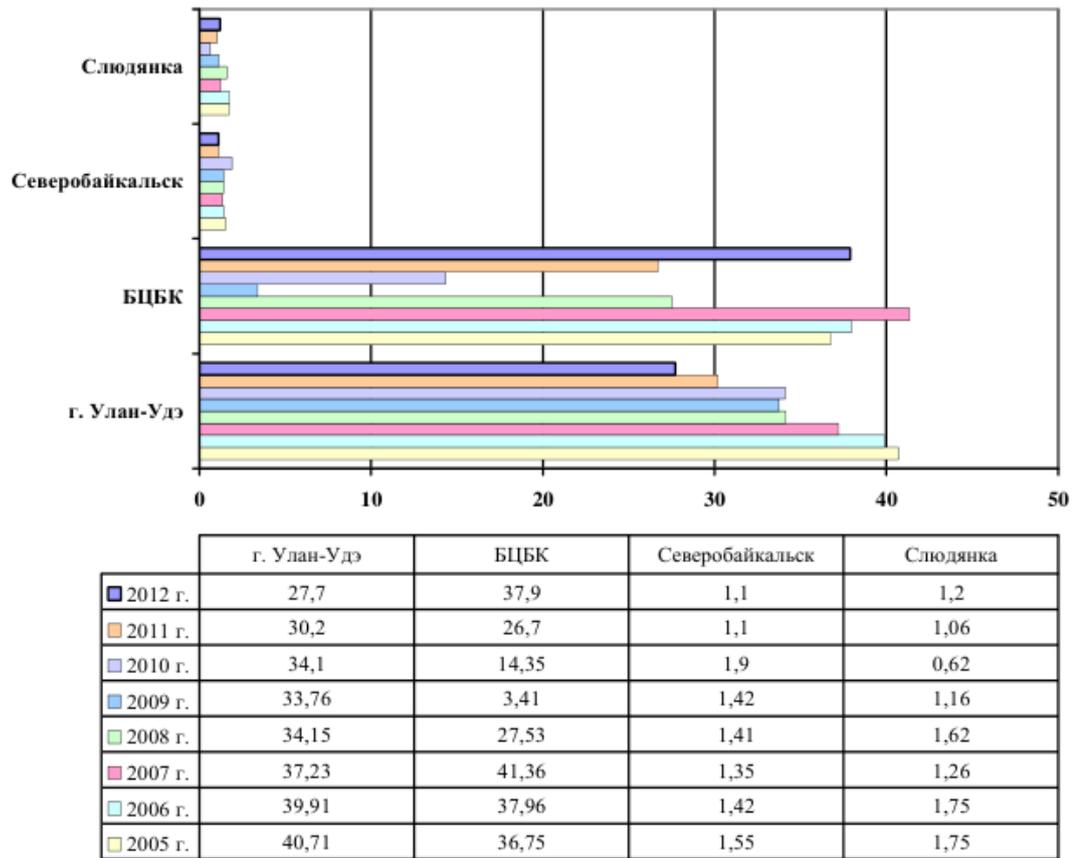


Рисунок 1.9 – Сбросы сточных вод нагрузки (млн. м³) с крупных центров техногенной нагрузки за период 2005-2012 гг. [Гос. доклад «О состоянии оз. Байкал ...», 2013]

Помимо этого, в докладе Института экологической токсикологии, им. А.М. Бейма за 2003 год [Природно-антропогенные объекты ..., 2003] отмечается, что в 2003 г. на полигоне в акватории озера, который расположен в районе сброса очищенных сточных вод (ОСВ) БЦБК, по сравнению с двумя более удаленными полигонами, на глубине 50 м были повышены концентрации углеводородов (на 1300%, до 0,062 мг/дм³) и содержания АОХ (на 34%, до 9,2 мкг/дм³). Сравнение результатов гидрохимических наблюдений 2003 г. с многолетними данными свидетельствует о том, что в районе сброса ОСВ БЦБК на протяжении последних 25 лет устойчиво наблюдается локальный ореол повышенных концентраций загрязняющих веществ – приоритетных компонентов ОСВ (Табл. 1.4).

В Государственных докладах «О состоянии озера Байкал ..» [Гос. доклад «О состоянии оз. Байкал ...», 2009, 2013, 2022] приводятся данные по содержанию этих компонентов, которые представлены на (Рис. 1.10, Табл. 1.4).

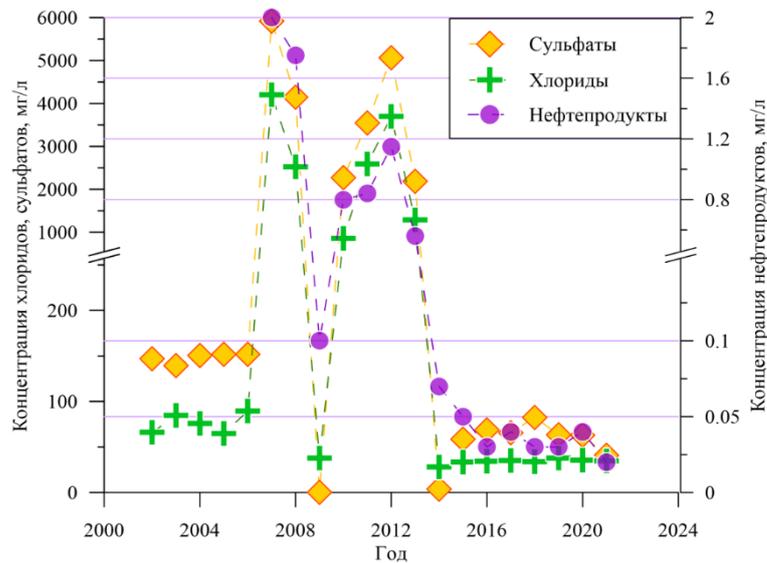


Рисунок 1.10 – Концентрации некоторых компонентов в очищенных сточных водах БЦБК за период 2002-2021 гг. [Гос. доклад «О состоянии оз. Байкал ...», 2009, 2013, 2022]

Таблица 1.4 – Содержание компонентов в очищенных сточных водах БЦБК [Гос. доклад «О состоянии оз. Байкал ...», 2004]

Компоненты, мг/дм ³	1980-е гг.	1990-е гг.	2003 г.
Натрий	120	110	103,7
Хлориды	110	101	84,5
Сульфаты	258	170	139,6
Фенолы	0,014	0,010	0,009
Сумма УВ	0,05	0,07	0,047

Результаты определения нормируемых показателей, в соответствии с нормами с 01.01.1985 г., определенными для контрольного стометрового створа в озере Байкал в районе БЦБК (Рис. 1.11) [Аниканова и др., 2009; Аниканова, 2018], свидетельствуют о повышенных значениях минерализации, сульфатов, хлоридов, взвешенных веществ и фенолов в период работы предприятия, однако после остановки производственной деятельности, наблюдается некоторое сокращение значений перечисленных показателей за исключением фенолов, которые содержатся в прежних количествах, что объясняется авторами за счет более существенного вклада коммунальных сточных вод города в приток этого компонента.

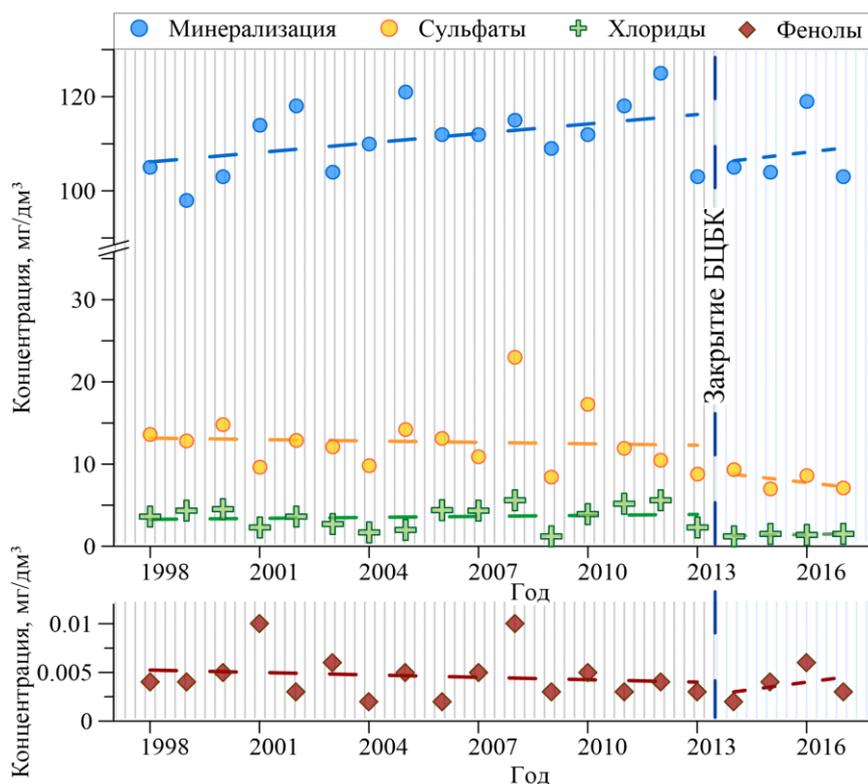


Рисунок 1.11 – Концентрации некоторых компонентов в очищенных сточных водах БЦБК за период 2002-2021 гг. [Аниканова и др., 2009]

Поступление контаминантов в озеро Байкал приводит к повышению содержания и других компонентов, появление которых обусловлено реакциями преобразования техногенных веществ. Так, например, в работах [Гарькуша и др., 2019, Гарькуша и др., 2023] приводятся результаты определения содержания метана (который не является контаминантом, поступающим с территории БЦБК) в воде и донных отложениях озера Байкал, полученные в ходе экспедиций 2014, 2015, 2016, 2019 годов. Отмечается, что содержание растворенного метана во воде ($2,1 \text{ мкл/дм}^3$) и донных отложениях ($0,07 \text{ мкг/г сух. ост.}$) станций пробоотбора, расположенных вблизи площадки БЦБК, в целом, близко к фоновым значениям [Гарькуша и др., 2019]. Однако несколько глубоководных (глубины 190–250 м) станций опробования показали повышенное значение растворенного метана в донных отложениях ($0,58\text{--}1,87 \text{ мкг/г сух. ост.}$), что может быть объяснено их расположением по направлению выпуска сточных вод БЦБК, а на текущий момент – глубинного выпуска очищенных коммунальных стоков г. Байкальска. Повышенное содержание метана на этом участке можно объяснить, например, разложением углеводородных соединений.

Также, согласно докладу «Качество поверхностных вод Российской Федерации» за 2014 год, отмечается, что биомасса представителя важнейших байкальских эндемиков – зоопланктона рачков эпишуры (*Epischura baicalensis* (Copepoda, Crustacea) в 3 раза ниже,

чем в незагрязненной части озера. Исследования, приведенные в работе [Балаян и др., 2016], показали накопление нефтепродуктов в жировых каплях рачков и в последующем проявлении нефтепродуктов в верхних звеньях пищевой цепи, что говорит о возможности накопления нефтепродуктов по трофической цепи.

В тексте доклада «Качество поверхностных вод Российской Федерации» за 2014 год отмечается, что в донных отложениях озера в районе площадки БЦБК выявлено повышение концентрации бенз(а)пирена (соответствует значению сильного загрязнения); помимо этого, максимальные содержания бенз(а)пирена в зообентосе превышают почти в 8 раз определения этого показателя в других районах озера. Также, в работе [Щетинина и др., 2011] отмечается, что отложениях литоральных зон озера структурные параметры микробиоценозов характеризуются узким количественным спектром для данной фации осадков и устойчиво реагируют на антропогенные возмущения.

Помимо воздействия на поверхностные воды озера Байкал за счет выпуска очищенных сточных вод, происходит инфильтрация осадков и утечки из трубопроводных сетей предприятия, которые, фильтруясь сквозь почву и горные породы, загрязненные различными органическими и минеральными веществами, достигают свободной поверхности водоносного комплекса неоген-четвертичных отложений, смешиваются с подземными водами и далее мигрируют в сторону озера, где и происходит их разгрузка.

Так, согласно докладу Института экологической токсикологии, им. А.М. Бейма за 2003 год [Природно-антропогенные объекты ..., 2003], отмечается, что характерными загрязнителями подземных вод на территории БЦБК являются хлориды (до 103,6 мг/дм³), натрий (до 112,0 мг/дм³), взвешенные вещества (до 35,6 мг/дм³), также выделяется высокое, относительно фонового, содержание гидрокарбонат-иона (до 405,8 мг/дм³) (Рис. 1.12).

В районе производственной площадки был сформирован участок загрязнения подземных вод, который сохраняется до настоящего времени, согласно [Состояние недр РФ: инф. бюлл., 2021] отмечалось повышенное содержание аммония (4,2 ПДК), алюминия (9,3 ПДК), бериллия (1,6 ПДК), ванадия (4,2 ПДК), железа (8,4 ПДК), никеля (2,9 ПДК), титана (6,5 ПДК), хрома (3 ПДК), мышьяка (1,5 ПДК), нефтепродуктов (15,0 ПДК), лигнина (20 ПДК), сульфатов (1,2 ПДК), фенолов (1,5 ПДК), а также превышение ПДК по перманганатной окисляемости (20 ПДК) и минерализации (2,4 ПДК) (Рис. 1.13). Также в этом докладе отмечается, что прекращение функционирования предприятия привело к сокращению интенсивности загрязнения подземных вод минеральными компонентами: превышение ПДК по сухому остатку с 7,5 ПДК до 1-2,4 ПДК, сульфатов – с 3,5 до 1,2 ПДК.

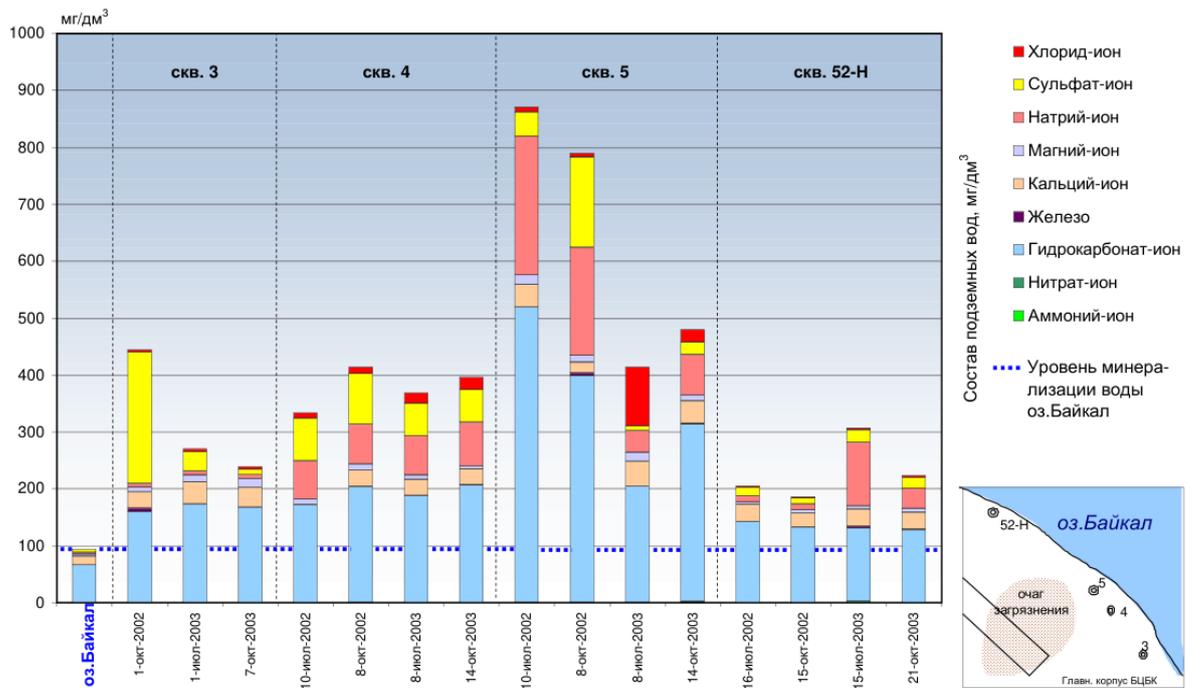


Рисунок 1.12 – Концентрации некоторых компонентов в подземных водах на территории БЦБК за период 2002-2003 гг. [Бейм, 2003]

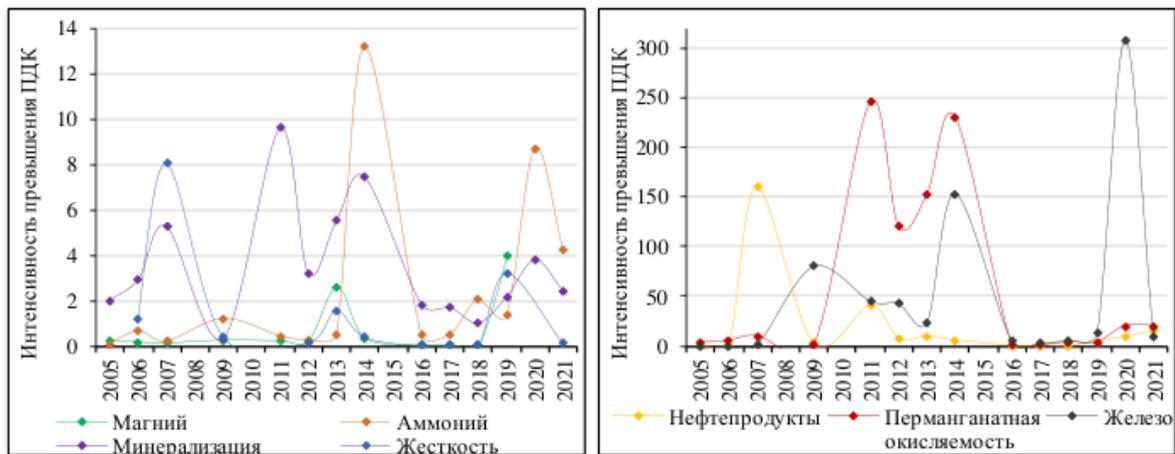


Рисунок 1.13 – Превышения ПДК некоторых компонентов в подземных водах площадки БЦБК за период 2005-2021 гг. [Состояние недр РФ: инф. бюлл., 2021]

Инфильтрация и утечки из коммуникаций на территории комбината привели к увеличению минерализации подземных вод более 10 000 мг/л при фоновом значении минерализации подземных вод до 200 мг/л [Шенькман, 2016]. В ходе опробования подземных вод в 2002 году максимальное выявленное значение минерализации зафиксировано в скважине 3002, расположенной ниже по направлению потока подземных вод от здания ТЭЦ и главного корпуса БЦБК (Рис. 1.14), составило 10250 мг/л. В 2022 году максимальное зафиксированное значение минерализации подземных вод приурочено к скважине 3077, расположенной между главным корпусом БЦБК и ТЭЦ, и составило 4604 мг/л. Результаты практически одномоментного мониторинга состава подземных вод на

2002 г. и на 2022 г. представлены на (Рис. 1.14), распределение минерализации подземных вод получено путем интерполяции методом кригинга значений этого показателя в отдельных скважинах. На (Рис. 1.14), видно, что область повышенных значений минерализации также находится между главным корпусом БЦБК и ТЭЦ. Можно отметить, что за двадцатилетний период произошло уменьшение максимальной минерализации подземных вод, что, по-видимому, связано с прекращением производственной деятельности предприятия, однако полного самоочищения подземных вод не произошло, что объясняется тем, что необходимые мероприятия по консервации технологических объектов не были произведены, последнее также объясняет смещение основного очага загрязнения вверх по потоку подземных вод от предыдущего максимума.

Температурное поле в пределах изучаемой территории характеризуется весьма значительным градиентом, по данным измерений, проведенных в 2002 году, от скважины 48 со значением температуры подземных вод 43°C , до скважины 6 с температурой подземных вод 9°C , расстояние до которой составляет менее 300 метров. Распределение температуры подземных вод, по данным измерений в 2022 году, характеризуется уже гораздо меньшей изменчивостью температур – от $6,2^{\circ}\text{C}$ в скважине 3075 до $16,7^{\circ}\text{C}$ в скважине 4103/2. Распределение температуры подземных вод, полученное путем интерполяции методом кригинга значений этого показателя в отдельных скважинах приведено на (Рис. 1.15).

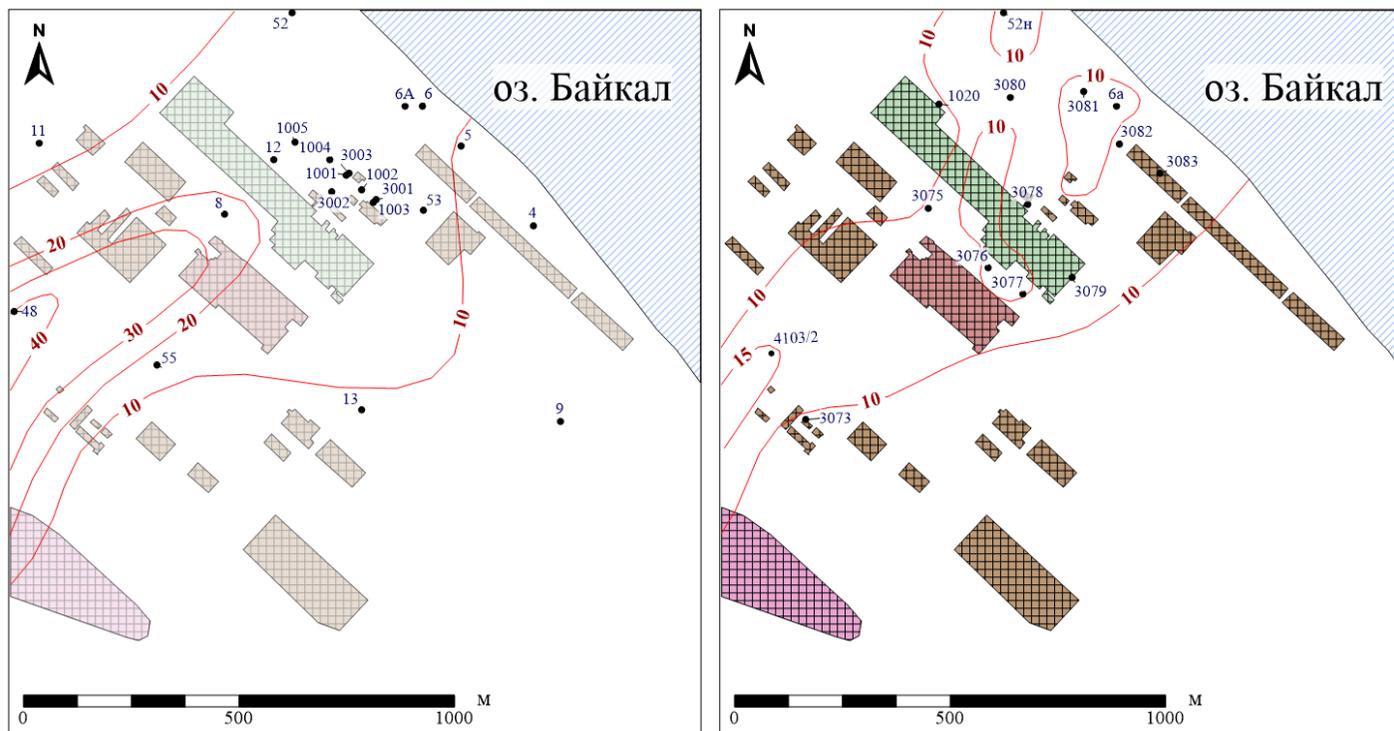
Для определения границ ореола теплового загрязнения требуется оценка фоновых значений температурного поля подземных вод. В ходе изучения распределения значений температуры подземных вод (Рис. 1.15) были выделены скважины 3н, 4н, 55н, 13, как наименее подверженные влиянию теплового загрязнения.

По данным значений температуры подземных вод в этих скважинах были рассчитаны статистические показатели, в том числе и в самые жаркие месяцы (июль-август) (Табл. 1.5). Можно отметить, что средние значения температуры в этих скважинах слабо отличаются. Соответственно, если принять во внимание, что при идентификации границ ореола теплового загрязнения температура подземных вод не должна превышать среднюю за самый жаркий месяц в течение 10 последних лет, то получается, что границы фронта теплового воздействия можно выделить по температуре 10°C (с учетом округления среднего значения до целого числа). В качестве фонового, наиболее часто встречающегося значения температуры подземных вод, согласно расчетам, представленным в Табл. 1.5, можно принять температуру 8°C.

При этом важно отметить, что верхняя часть горизонта подземных вод находится в зоне, подверженной значительным сезонным колебаниям температур, амплитуды которых затухают с глубиной. В работе [Anderson, 2005] отмечается, что у неглубокозалегающих подземных вод, к которым относятся подземные воды изучаемой территории, температура на 1-2°C выше, чем среднегодовая температура воздуха на поверхности, также, в зоне разгрузки подземных вод происходит отклонение профиля температур от геотермального профиля вправо (в сторону увеличения температур), в то время как в области питания подземных вод наблюдается противоположная картина (Рис. 1.16), соответственно, температура подземных вод, в области питания (выше по потоку подземных вод от площадки БЦБК) должна быть ниже и, согласно, имеющимся данным мониторинга, может быть принята равной 6°C.

Таблица 1.5 – Статистические показатели по данным замеров температуры (°C) подземных вод в скважинах 3н, 4н, 55н, 13

	Количество замеров	Среднее	Медиана	Мода	Минимум	Максимум
Все месяцы	114	9,1	8,3	8,0	2,0	18,5
Июль-август	26	9,6	8,3	8,0	5,7	18,0



Условные обозначения

- | | | | | | |
|---|------------------------------|---|--------------------------|---|---|
|  | Здание главного корпуса БЦБК |  | Здания и сооружения БЦБК |  | Скважина и её номер |
|  | Здание ТЭЦ |  | Карта №11 |  | Изолинии температуры подземных вод
число - температура, °С |

Рисунок 1.15 – Температура подземных вод в районе БЦБК по данным опробования в 2002 и 2022 году



Рисунок 1.16 – Схематические температурные профили, показывающие отклонения от геотермального градиента в области питания и разгрузки [Anderson, 2005]

Еще одним контаминантом, характеризующим загрязнение подземных вод на территории БЦБК являются растворенные нефтепродукты, распределение которых в очищенных сточных водах, в целом, повторяет распределение содержания растворенных минеральных веществ (Рис. 1.10), однако, исходя из его неминерального происхождения, можно ожидать другие источники его поступления в природную среду, связанные с иными объектами инфраструктуры предприятия.

Согласно ГОСТ 17.1.4.01-80, содержание растворенных нефтепродуктов – это комплексный показатель суммарного количества неполярных и малополярных углеводородов (алифатические, ароматические и алициклические), составляющих главную и наиболее характерную часть нефти и продуктов ее переработки. Соответственно, в эту группу входят многие виды топлива, растворители и смазочные масла [Другов, Родин, 2007], широко применяемые во многих отраслях промышленности, в том числе и целлюлозно-бумажной. Длительное накопление нефтепродуктов в горизонте подземных вод может приводить к значительной трансформации состава подземных вод – увеличению содержания метана, сероводорода, двухвалентного железа [Хаустов, Редина, 2012], что ведет к образованию вторичных очагов загрязнения подземных вод.

Ввиду того, что содержание нефтепродуктов непосредственно в подземных водах не нормируется, оценка степени загрязненности была произведена путем сравнения с предельно-допустимой концентрацией для питьевых вод по СанПиН 2.1.3684-21 – 0,1 мг/л и со значением 0,05 мг/л, согласно [Перечень рыбохозяйственных нормативов...], так как воды озера Байкал эксплуатируются в областях действия этих норм. Также, согласно

[Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 83...], допустимое содержание вредных веществ в сточных водах, сбрасываемых непосредственно в озеро Байкал, по концентрации растворенных нефтепродуктов установлено на значении 0,01 мг/л. В то же время, согласно упомянутому приказу, допустимое содержание вредных веществ в сточных водах, сбрасываемых в водные объекты в пределах центральной и буферной экологических зон, за исключением вредных веществ в сточных водах, сбрасываемых централизованными и локальными системами водоотведения поселений или городских округов в пределах центральной и буферной экологических зон устанавливает значение для нефтепродуктов 0,05 мг/л, соответствующее нормативу для водоемов рыбохозяйственного назначения.

Выявленные в подземных водах площадки БЦБК концентрации нефтепродуктов находятся в диапазоне 0,005-17,3 мг/л (Рис. 1.17-1.18), что составляет 0,05-173 ПДК для питьевых вод и 0,1-346 ПДК для вод рыбохозяйственного назначения. Графическое изображение (Рис. 1.18) содержания растворенных нефтепродуктов в подземных водах территории исследования получено путем интерполяции методом кригинга значений этого показателя в отдельных скважинах по данным единовременного опробования в 2002 г. и 2022г. Максимальное загрязнение в начальный момент исследуемого периода времени на 2002 г. составило 0,45 мг/л, его очаг зафиксирован ниже по потоку от главного корпуса БЦБК (Рис. 1.18). На период завершения инженерно-геологических изысканий в 2022 г. источник загрязнения находился на участке между главным корпусом БЦБК и ТЭЦ (\approx 230 м выше по течению потока подземных вод) и составил 17,3 мг/л (Рис. 1.18). В работе [Отчетная документация по инженерным изысканиям..., 2021], отмечается, что при оценке уровня загрязненности подземных вод в зоне влияния хозяйственных объектов, согласно СП 502.132.5800.2021, экологическая обстановка для подземных вод площадки БЦБК по показателю содержания растворенных нефтепродуктов относится к «чрезвычайной экологической ситуации», в то время как по содержанию железа, свинца, никеля, марганца, хрома, кадмия, алюминия, фенолов и минерализации – к «относительно удовлетворительной ситуации».

В процессе бурения новых скважин в ходе инженерных изысканий, проведенных в 2022 году, производилось поинтервальное опробование подземных вод. Распределение растворенных нефтепродуктов по стволу скважины 3082 приведено в Табл. 1.6. Выявленная глубина проникновения загрязнения растворенными нефтепродуктами соответствует имеющейся фондовой информации о вертикальном распределении других растворенных веществ техногенного генезиса.

Таблица 1.6 – Содержание растворенных нефтепродуктов при поинтервальном опробовании скважины 3082

Глубина, м	Растворенные нефтепродукты, мг/л
15	1,850
20	1,260
25	0,485
30	0,175
40	0,136
50	0,002

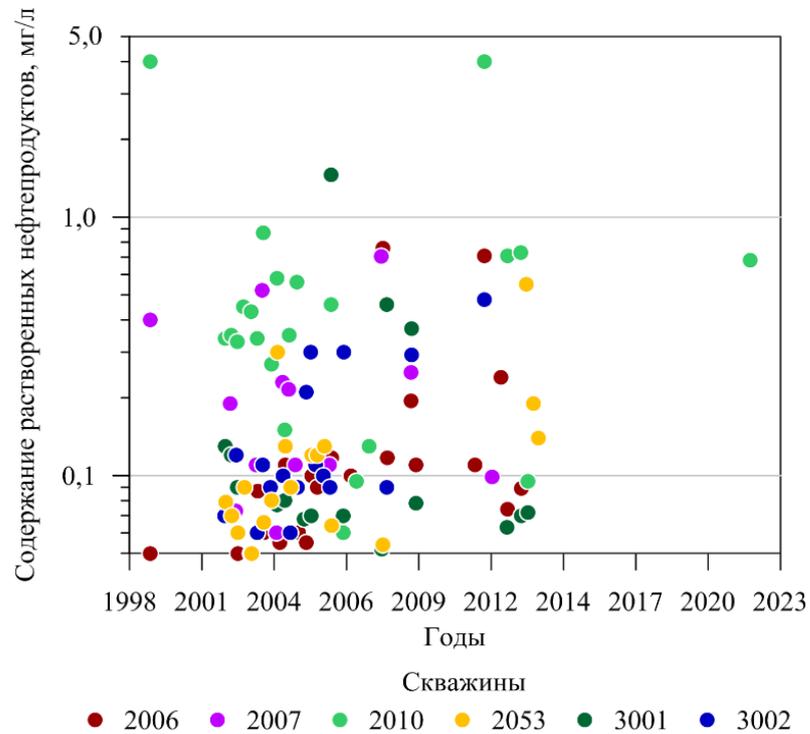
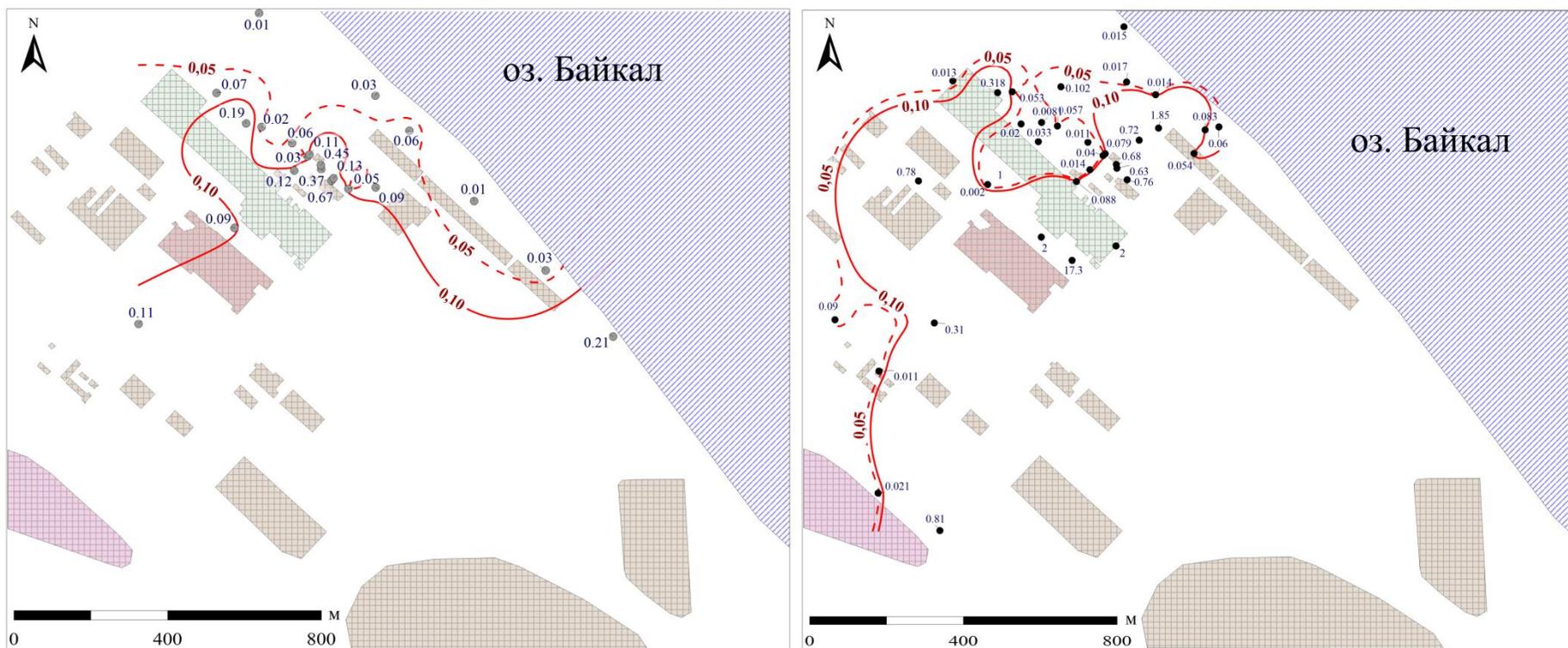


Рисунок 1.17 – Содержание растворенных нефтепродуктов в подземных водах по данным определений в скважинах перехватывающего водозабора



Условные обозначения

- | | | | | | | |
|---|------------------------------|---|--------------------------|---|-------|--|
|  | Здание главного корпуса БЦБК |  | Здания и сооружения БЦБК |  | 0,05- | Результат интерполяции данных концентрации растворенных нефтепродуктов, мг/л |
|  | Здание ТЭЦ |  | Карта № 11 |  | 0,10- | Результат интерполяции данных концентрации растворенных нефтепродуктов, мг/л |
| | | | |  | 0,05 | Концентрация растворенных нефтепродуктов в скважине, мг/л |

Рисунок 1.18 – Содержание растворенных нефтепродуктов в подземных водах в районе БЦБК по данным опробования в 2002 и 2022 году

1.3. Выводы к главе 1

1. Обобщение опубликованных и фондовых материалов позволяет сделать вывод о наличии активного поступления контаминантов (растворенных минеральных веществ, растворенных нефтепродуктов) в подземные воды даже после остановки производственной деятельности на территории предприятия.

2. Основные выявленные ореолы повышенных концентраций растворенного загрязнения поменяли локализацию за двадцатилетний период мониторинга, однако явно приурочены к главному корпусу БЦБК и ТЭЦ, а также – к карте №11.

3. Выявленный ореол растворенных нефтепродуктов довольно широко простирается вкост направлении потока подземных вод и вверх по потоку от главного корпуса БЦБК и ТЭЦ, что можно объяснить неединственностью их источника, соответственно, выявление возможных участков поступления нефтепродуктов в подземные воды является актуальной задачей. В имеющемся массиве данных содержание нефтепродуктов охарактеризовано довольно детально в площадном и временном измерении, что предоставляет возможность применения модельно-ориентированного подхода для установления источников их поступления, изучению их миграции в подземных водах и составлению прогнозов развития ситуации.

4. Определено значение фоновой температуры подземных вод на территории БЦБК, которое составило 8°C, повышенная температура подземных вод (до 15°C) сохраняется в районе карты №11 даже после остановки производственной деятельности БЦБК в виду использования ее в технологическом цикле ТЭЦ. Также повышенная температура отмечалась между главным корпусом БЦБК и ТЭЦ, где расположена значительная часть трубопроводов, по которым осуществлялась транспортировка технологических жидкостей, в том числе и нагретых.

Глава 2. Техногенные миграционные процессы в подземных водах побережья озера Байкал

2.1. Конвективно-дисперсионный перенос растворенных веществ в водоносных горизонтах

Описание и изучение процессов миграции подземных вод с растворенными компонентами производится, в основном, при помощи численного моделирования процесса массопереноса, для этого сам процесс представляется в виде математической модели, которая с достаточной достоверностью описывает его. Массоперенос представляет собой перемещение компонентов с потоком подземных вод, которое, происходит совместно с процессом рассеивания за счет процессов гидродинамической дисперсии и диффузии. Некоторые вещества в процессе миграции подвержены распаду (разложению), а также сорбции на твердых частицах за счет физико-химического взаимодействия. Единая модель, учитывающая вышеперечисленные процессы представлена уравнением конвективно-дисперсионного переноса, которое основано на представлении баланса массы в элементе породы, включающем источники, стоки, накопление и вынос вещества за определенный период времени [Langevin et al, 2008]:

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{D} \nabla C - \nabla \cdot (\mathbf{u} C) + \frac{q_{ss} C_{ss}}{n} - \lambda RC, \quad R = 1 + \frac{\rho_d K_d}{n}, \quad (2.1)$$

где ρ_d – объемный вес породы, кг/м³; K_d – коэффициент распределения, м³/кг; C – концентрация растворенного вещества, кг/м³; \mathbf{u} – вектор действительной скорости фильтрации; t – время, сут; $\nabla \cdot$ – дивергенция; D – тензор гидродисперсии; ∇ – градиент; q_{ss} – расход источника-стока, м³/сут; C_{ss} – концентрация растворенного вещества в источнике-стоке, кг/м³; R – коэффициент замедления, -; n – активная пористость, -; λ – константа распада, сут⁻¹.

Современный подход к описанию переноса энергии и массы фильтрационным потоком состоит в том, что влияние средней скорости потока на этот перенос учитывается в конвективных членах соответствующих моделей переноса, а влияния его флуктуаций в дисперсионных членах [Bear, 1972; Румынин, 2011]. Введение дисперсионных членов в математические модели переноса вещества и тепла в подземных водах направлено на учет влияния локальной неоднородности разного масштаба поля скоростей фильтрации на формирование миграционных и тепловых ореолов.

Для решения задач, связанных с распространением загрязнения, существенное значение имеет изучение дисперсии, ввиду ее особенной роли в формировании ореолов распространения контаминантов (вещества и тепла) в подземных водах. Дисперсия, связанная с процессами массопереноса хорошо изучена [Scheidegger, 1961; Bear, 1972; Neuman, 1990; Schulze-Makuch, 2005; Лехов, 2010; Никуленков, 2011; Pozdniakov et al., 2021]. Согласно упомянутым работам, в водоносных горизонтах наиболее существенна продольная гидродисперсия [Лехов, 2010] в направлении потока подземных вод, которая учитывается, как правило, в виде линейной связи с действительной скоростью потока через параметр продольной дисперсивности:

$$D_L = \alpha_L u + D_m, \quad (2.2)$$

где D_L – продольная гидродисперсия, м²/сут; α_L – продольная дисперсивность, м; u – действительная скорость фильтрации, м/сут; D_m – коэффициент молекулярной диффузии в пористой среде, м²/сут.

Следует отметить, что уравнение (2.2) основывается на факте, что общий параметр продольной гидродисперсии можно представить в виде суммы двух параметров, отвечающих за различную природу рассеивания – фильтрационной дисперсии и молекулярной диффузии. При этом, молекулярная диффузия для водоносных горизонтов мала (существенно меньше вклада первого слагаемого в этом уравнении) [Лехов, 2010; Румынин, 2011] и не имеет практического значения в рамках масштабов полевых исследований.

В прямоугольных координатах выражения для диагональных компонент тензора гидродисперсии имеют вид [Bear, 1972]:

$$\begin{aligned} D_{xx} &= \alpha_L \frac{u_x^2}{|u|} + \alpha_{T_H} \frac{u_y^2}{|u|} + \alpha_{T_V} \frac{u_z^2}{|u|} + D_m \\ D_{yy} &= \alpha_L \frac{u_y^2}{|u|} + \alpha_{T_H} \frac{u_x^2}{|u|} + \alpha_{T_V} \frac{u_z^2}{|u|} + D_m \\ D_{zz} &= \alpha_L \frac{u_z^2}{|u|} + \alpha_{T_H} \frac{u_x^2}{|u|} + \alpha_{T_V} \frac{u_y^2}{|u|} + D_m \\ v &= \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \end{aligned} \quad (2.3),$$

где α_{T_H} – горизонтальная поперечная дисперсивность, м; α_{T_V} – вертикальная поперечная дисперсивность, м.

Ввиду того, что флуктуации поля скоростей потока подземных вод могут иметь различные масштабы проявления, связанные с масштабами неоднородности фильтрационной среды, первый член в уравнении (2.2) часто трактуется как произведение скорости течения на масштаб неоднородности, который, в свою очередь, связан с характерным размером области, в которой происходит конвективный перенос [Мироненко, Румынин, 1986]. В работе [Gelhar et al, 1992], на основе анализа большого количества полевых данных, показана линейная связь параметра продольной дисперсивности с продольным размером ореола распространения консервативного трассера. Чуть позже, Линн Гелхар [Gelhar, 1993] обосновал теоретическую связь продольной дисперсивности с масштабом характерной неоднородности фильтрационных свойств. В работе [Лехов, 2010] приведены данные обобщения материалов мониторинга загрязнения и результатов опытно-миграционных работ, которые показывают, что для пути миграции от 100 м до 1000 м значения продольной дисперсивности, в основном, лежат в диапазоне 10-300 м. При этом отмечается, что при анализе массива данных для поровых коллекторов, можно выделить две закономерности: согласно первой – существует линейная зависимость продольной дисперсивности от длины пути миграции, тогда как вторая показывает относительно похожие значения продольной дисперсивности до 2 м, независимо от длины пути миграции. В работах [Neuman, 1990; Schulze-Makuch, 2005, Румынин, 2020] приводится эмпирическая зависимость связи параметра продольной дисперсивности с масштабом исследования (длиной пути миграции вещества), определенная на основе обобщения данных опубликованных исследований:

$$\alpha_L = c(L)^m, \quad (2.4)$$

где α_L – продольная дисперсивность, м; L – масштаб исследования, м; c – параметр, характеризующий геологическое пространство, m^{-1} ; m – показатель степени (наклон прямой на графике в двойном логарифмическом масштабе).

Поперечная гидродисперсия описывается аналогичной линейной зависимостью от скорости фильтрации (2.2). Значимость поперечной гидродисперсии увеличивается с укрупнением масштаба переноса, а точнее – боковой поверхности плюма мигрирующих контаминантов [Румынин, 2011]. Значение параметра поперечной дисперсивности для гомогенных сред обычно в 5-10 раз меньше, чем у параметра продольной дисперсивности [Лехов, 2010].

Случай консервативного мигранта

В некоторых случаях, свойства мигрирующего компонента таковы, что позволяют не учитывать процесс распада и сорбции, такой компонент называется консервативным или нейтральным [Лехов, 2010] и уравнение (2.1), описывающее его перенос принимает следующий сокращенный вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{D} \nabla C - \nabla \cdot (\mathbf{u}C) + \frac{q_{ss} C_{ss}}{n}, \quad (2.4)$$

Случай сорбируемого мигранта

На перенос некоторых видов растворенных веществ в подземных водах значительное влияние оказывает процесс сорбции, который зависит от состава минералов, их удельной поверхности, химического состава подземных вод.

Уравнение конвективно-дисперсионного переноса приобретает следующий вид:

$$\left(1 + \frac{\rho_d K_d}{n}\right) \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{D} \nabla C - \nabla \cdot (\mathbf{u}C) + \frac{q_{ss} C_{ss}}{n}, \quad (2.5)$$

Случай распадающегося мигранта

Некоторые вещества в процессе миграции подвержены превращениям, которые приводят к необратимому их исчезновению, например, биоразложение или радиоактивный распад. Описание убыли вещества вследствие деструкции – сложного, зачастую, многостадийного процесса, наиболее часто и, при этом, достаточно достоверно описывается простой моделью распада необратимой реакции распада первого порядка, когда скорость исчезновения реагента или образования вещества пропорциональна концентрации реагента:

$$-\frac{dC}{dt} = \lambda C, \quad (2.6)$$

Соответственно, в уравнение конвективно-дисперсионного переноса добавляется последний член и уравнение приобретает вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{D} \nabla C - \nabla \cdot (\mathbf{u}C) + \frac{q_{ss} C_{ss}}{n} - \lambda C, \quad (2.7)$$

2.2. Теплоперенос в водоносных горизонтах

Расчетный код MT3DMS [Zheng & Wang, 1999] ориентирован на решение задач переноса вещества, согласно модели (2.1), однако, ввиду подобия форм представления обобщенных законов переноса (законы Дарси, Фурье, Ома и др.), представляется возможным выполнять и расчет теплопереноса при условии адаптации некоторых коэффициентов.

Соответственно, для решения теплопереноса выражение для продольной дисперсивности (2.2) будет выглядеть следующим образом [de Marsily, 1986]:

$$D_L = \beta_L u_t + D_{тер}, \quad (2.8)$$

где β_L – продольная термодисперсивность, м; u_t – скорость движения теплового фронта, м/сут.

Коэффициент молекулярной диффузии – D_m в выражении (2.2) для теплопереноса был представлен как коэффициент тепловой диффузии – $D_{тер}$:

$$D_{тер} = \frac{K}{n \rho_f C_f}, \quad (2.9)$$

где K – теплопроводность пласта, Вт/м/град, которая представлена как выражение (2.10); u_t – скорость движения теплового фронта, м/сут; n – активная пористость, д.е. ρ_f – плотность воды, кг/м³; C_f – теплоемкость воды, Дж/кг/град.

$$K = nK_f + (1-n)K_s, \quad (2.10)$$

где K_f – теплопроводность воды, Вт/м/град; K_s – теплопроводность породы, Вт/м/град.

Скорость движения теплового фронта связана с действительной скоростью фильтрации:

$$u_t = u \frac{\rho_w c_w}{\rho c} n \quad (2.11)$$

$$u_t = \frac{dl}{dt} (n + (1-n) \frac{c_{ck} \rho_{ck}}{c \rho})^{-1} = v / n_t; \quad n_t = n + (1-n) \frac{c_{ck} \rho_{ck}}{c \rho} \quad (2.12)$$

Соответственно, уравнение теплопереноса может быть представлено в следующем виде [Langevin et al, 2008]:

$$\left(\frac{\rho c}{n \rho_w c_w} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{D}_t \nabla T - \nabla \cdot (\mathbf{u} T) + \frac{q_h}{n \rho_w c_w}, \quad (2.13)$$

где q_h – приток-отток тепла, Вт/м³; \mathbf{D}_t – тензор гидродисперсии для теплопереноса.

По структуре запись тензора гидродисперсии для теплопереноса в прямоугольных координатах аналогична выражению (2.3), где дисперсивности заменяются на термодисперсивности $\beta_L, \beta_{T_H}, \beta_{T_V}$, а молекулярная диффузия определяется согласно выражению (2.9). В прямоугольных координатах выражения для диагональных компонент тензора гидродисперсии имеют вид [Bear, 1972]:

$$\begin{aligned} D_{xx} &= \beta_L \frac{u_{tx}^2}{|u_t|} + \beta_{T_H} \frac{u_{ty}^2}{|u_t|} \beta_{T_V} + \frac{u_{tz}^2}{|u_t|} + D_{теп} \\ D_{yy} &= \beta_L \frac{u_{ty}^2}{|u_t|} + \beta_{T_H} \frac{u_{tx}^2}{|u_t|} + \beta_{T_V} \frac{u_{tz}^2}{|u_t|} + D_{теп} \quad , \\ D_{zz} &= \beta_L \frac{u_{tz}^2}{|u_t|} + \beta_{T_H} \frac{u_{tx}^2}{|u_t|} + \beta_{T_V} \frac{u_{ty}^2}{|u_t|} + D_{теп} \\ u_t &= \sqrt{u_{tx}^2 + u_{ty}^2 + u_{tz}^2} \end{aligned} \quad (2.14),$$

где α_{T_H} – горизонтальная поперечная дисперсивность, м; α_{T_V} – вертикальная поперечная дисперсивность, м.

Из приведенных выше выражений следует, что, при характерных значениях плотностей и теплоемкостей фильтрующейся жидкости и вмещающих пород, а также при активной пористости скорость движения теплового фронта всегда меньше скорости движения консервативного трассера. С другой стороны, при теплопереносе в подземных водах значительную роль играет кондуктивный перенос за счет теплопроводности водонасыщенной среды, поэтому оценка вклада этих процессов требует дополнительных исследований. В работе [Sommer et al., 2013] приведены теоретические оценки термодисперсивности при теплопереносе в неоднородной водовмещающей среде. Оказалось, что продольная термодисперсивность также как и в случае миграции консервативного трассера [Gelhar, 1993], линейно связана с характерным размером неоднородности. Однако гидродисперсия при переносе тепла зависит также и от теплопроводностей и теплоемкостей воды и скелета породы [Irvine et al., 2015], экспериментальные исследования, приведенные в работе [Rau et al., 2012], показали, что при низких числах Пекле отмечается нелинейная связь гидродисперсии и скоростей фильтрации.

2.3. Геомиграционная модель участка исследований

Для изучения миграции контаминантов различного генезиса была разработана трехмерная геомиграционная модель в программном комплексе MODFLOW-2005 и MT3DMS [Waterloo Hydrogeologic].

Объект исследования представляет собой участок берега озера Байкал. Естественный поток первого от поверхности водоносного комплекса неоген-четвертичных отложений направлен в сторону озера, выбрана территория, охватывающая известные очаги загрязнения: главный корпус БЦБК, ТЭЦ, карту №11 (п. 1.2.), с учетом определенной области распределения контаминантов за двадцатилетний период. При моделировании рассматривались верхние 100 м разреза, что превышает выявленную глубину проникновения загрязнения в подземные воды территории и позволяет выделить нижний слой модели с незатронутыми антропогенным влиянием характеристиками состава и свойств вод (фоновые характеристики). Стоит отметить, что ранее для этого объекта была разработана трехмерная геофильтрационная модель для обоснования работы перехватывающего водозабора [Расторгуев, Куранов, 2002] для центральной площадки предприятия (без учета карты №11) ввиду того, что на ней не производились миграционные расчеты.

Геофильтрационная схематизация

Рассматриваемый процесс миграции контаминантов различного генезиса с территории БЦБК представляет собой нестационарный процесс, ввиду неравномерной работы перехватывающего водозабора, а также неоднородной по времени интенсивности техногенной инфильтрации.

Пространственная структура потока подземных вод первого от поверхности водоносного комплекса неоген-четвертичных отложений имеет трехмерную форму, ввиду наличия деформаций линий тока, связанных с формированием депрессионной воронки при работе перехватывающего водозабора. Основное направление потока подземных вод в сторону региональной дрены – озера Байкал, характер поверхности потока – безнапорный.

Верхней границей потока является его свободная поверхность, над которой расположена зона аэрации, соответственно, верхней границей моделируемой области является поверхность земли, на которую задавалось инфильтрационное питание (природное и техногенное).

Нижняя граница модели проведена в зоне, не подверженной антропогенному влиянию, согласно предпосылке о направленности потока первого от поверхности горизонта подземных вод в сторону озера. Положение нижней границы потока

не определено, описанная мощность вмещающих отложений составляет ~110 м [Макаров, 2016], согласно обработке геофизических данных ~150 м [Реконструкция ТЭЦ БЦБК..., 2015], предполагаемая на основе картирования ~500 м [Шенькман, 2016; Гос. геол. Карта РФ масштаба 1 : 1 000 000 лист М-48 (Улан-Удэ)]. В геомиграционной модели будут рассматриваться верхние 100 м разреза, так как сведения о нижележащей части водоносного комплекса – отсутствуют, водозаборные скважины имеют глубину 10-20 м, сведения о наличии загрязнения есть до глубин 50 м.

В плане границы модели выделены следующим образом: северная и южная границы непроницаемые (второго рода), проведены по линиям тока подземных вод; восточная граница, приуроченная к контуру озера Байкал, представляющему границу равного напора (первого рода) была задана в соответствии со средней величиной уровня вод озера по данным поста Порт Байкал на период моделирования – 455,36 м; на западной границе модели, согласно материалам инженерно-геологических изысканий, задан градиент потока подземных вод равный 0,003, рассчитанный по данным изысканий 2021 г. [Отчетная документация по инженерным изысканиям..., 2021]. Моделирование такого условия произведено с помощью пакета «General Head Boundary» [McDonald, Harbaugh, 1988], чтобы градиент потока не зависел от решения в расчетной области.

$$Q = \frac{k * F}{L} (H_{\Gamma} - H) \quad (2.15)$$

где Q – расход с границы ГНВ, м³/сут; k – коэффициент фильтрации в приграничном блоке, м/сут; F – площадь блока в направлении потока, м²; L – расстояние до удаленной границы, м; $H_{\Gamma} = i * L$, i – градиент, безразмерный; H – напор в блоке, м.

При этом для задания постоянного градиента должно соблюдаться условие: $L \gg H$, например, при $L = 10^{10}$ м. Тогда выражение (2.15) приходит к виду $Q = k * F * i$, т.е. приток с границы происходит с заданным градиентом.

Инфильтрационное питание задавалось на всей площади модели и составило 0,0003 м/сут (было принято, как 15% от атмосферных осадков, согласно [Хаустов, 1982; Карта естественных ресурсов ...]). Основываясь на материалах гидрогеологических работ, проведенных в начале 2000-х годов, которые выявили «куполообразное» [Шенькман, 2016] строение поверхности подземных вод на участке между главным корпусом БЦБК и зданием ТЭЦ, а также данных о сбросе вод с ТЭЦ в карту №11, были выделены два участка повышенного техногенного питания, где задавалось повышенное инфильтрационное питание 0,003 м/сут – на порядок больше естественного инфильтрационного питания, ввиду

отсутствия фактической информации об утечках с территории предприятия, далее значение этого параметра будет уточняться в ходе калибровки модели.

Внутренним граничным условием на модели является перехватывающий водозабор, представленный 8 скважинами глубиной 35-70 м (Рис. 2.1), который функционировал 12 лет. Дебит водозаборных скважин за время работы водозабора был весьма неравномерный, пример изменения дебита водозаборных скважин 2007, 2009, 2053 приведен на Рис. 2.2.

Фильтрационные свойства неоген-четвертичного водоносного комплекса аллювиальных, аллювиально-пролювиальных отложений получены путем обобщения архивной информации о результатах опытно-фильтрационных работ, проводимых в течение работы предприятия, обработки поинтервальных опробований, проводимых при сооружении новых скважин в 2022 году, а также с учетом ранее разработанной геофильтрационной модели для небольшого участка территории БЦБК, описывающего область влияния перехватывающего водозабора [Расторгуев, Куранов, 2002], прошедшей калибровку по опыту эксплуатации перехватывающего водозабора. Для вмещающих отложений были приняты коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении – 34 м/сут, в вертикальном – 10 м/сут, в соответствии с ранее разработанной моделью [Расторгуев, Куранов, 2002], данные величины соответствует диапазону значений коэффициента фильтрации, полученному при обработке результатов опытно-фильтрационных работ, изложенных, в том числе, и в работе [Шенькман, 2016]. Величина параметра гравитационной ёмкости пласта была определена равной 0,25, в соответствии с ранее разработанной моделью [Расторгуев, Куранов, 2002].

Вычислительная схематизация

Воспроизведение работы перехватывающего водозабора, а также последующих прогнозных расчетов, произведено путем задания 68 стресс-периодов, каждый из которых представлен 3-10 временными шагами.

Моделируемая область в плане 1938×1543 м и 100 м в разрезе была разбита неравномерной прямоугольной сеткой 118×83 блоков, с размерами блоков от 240×200 м в крайних частях модели, до 5×5 м на участках расположения перехватывающих скважин (Рис. 2.1). Для учета трансформаций свойств потока в вертикальном направлении было выделено 10 слоев мощностью от 3 м (на глубинах значительного техногенного воздействия) до 40 м – для нижнего слоя, характеризующего неизменную часть водоносного горизонта.

В качестве начального условия во все ячейки задавалось значение напора 479,56 м.

В процессе моделирования рассматривался период 7528 сут (~ 20 лет с начала 2002 года до 3 квартала 2022 года, что позволяет воспроизвести наиболее полный массив данных с результатами наблюдений за уровнем подземных вод, а также мониторинга состава и свойств подземных вод [Сорокоумова и др., 2024].

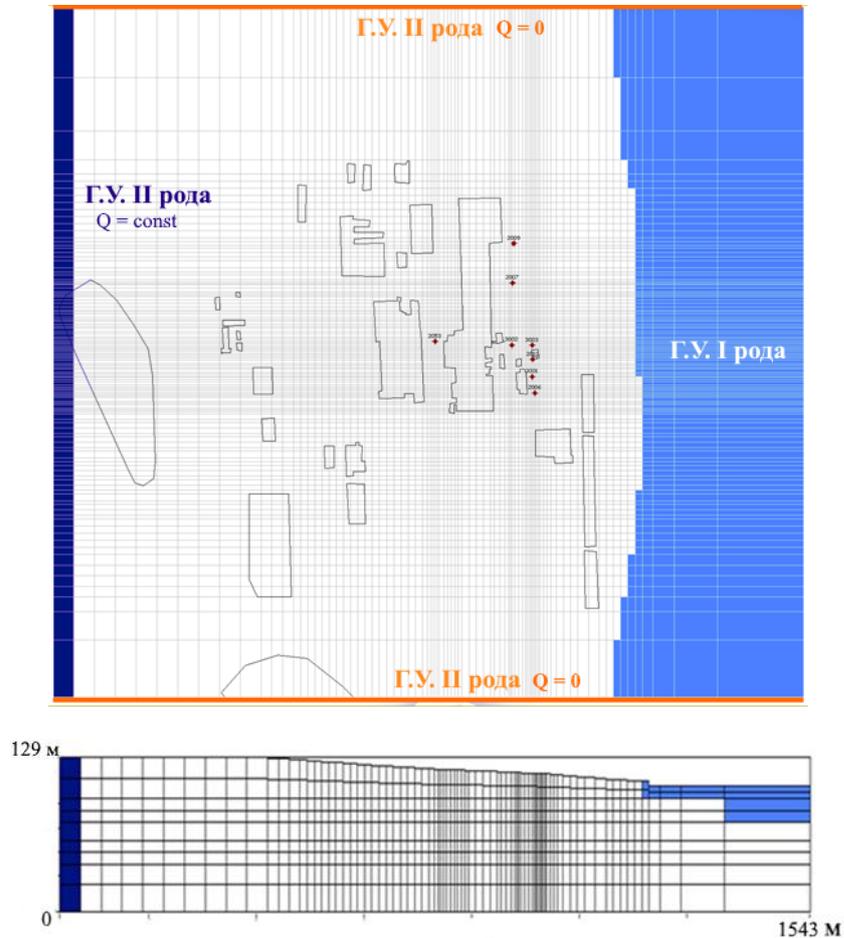


Рисунок 2.1 – Плановая и профильная дискретизация геофильтрационной модели с изображением точек расположения скважин перехватывающего водозабора

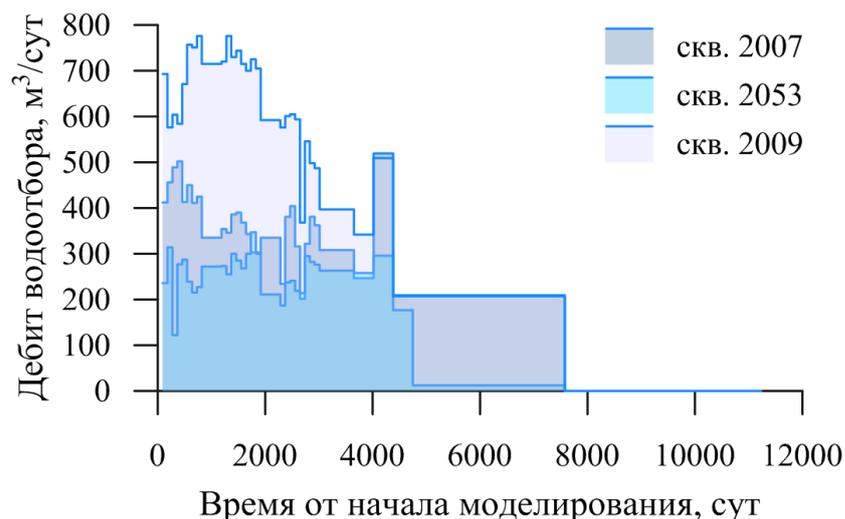


Рисунок 2.2 – Дебит водоотбора из скважин 2007, 2053, 2009

Результаты геофильтрационных расчетов и калибровки модели

Количественная оценка сопоставления результатов расчетов с данными мониторинга проводилась путем сравнения значений нормализованных среднеквадратических ошибок (НСКО), определяемых согласно выражению (2.10) и позволяющих оценить относительное соотношение модельных и наблюдаемых значений:

$$\text{НСКО} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{cal}_i - \text{obs}_i)^2}, \quad (2.15)$$

где N – количество наблюдений; cal_i – значение, полученное при моделировании; obs_i – наблюдаемое значение.

В ходе калибровки модели инфильтрационное питание на участке между главным корпусом БЦБК и зданием ТЭЦ, было увеличено до 0,13 м/сут, на источнике в карте №11 до 0,1 м/сут.

Сопоставление фактических и модельных уровней по наблюдательным скважинам 55Н (выше по потоку от ТЭЦ) и 1001 (ниже по потоку от главного корпуса БЦБК) приведено на Рис. 2.3, 2.4. Решение фильтрационной задачи показало достаточную сходимость с массивом фактических данных по замерам уровней, диапазон вариации нормализованной ошибки для всех стресс-периодов составил ~10-18%.

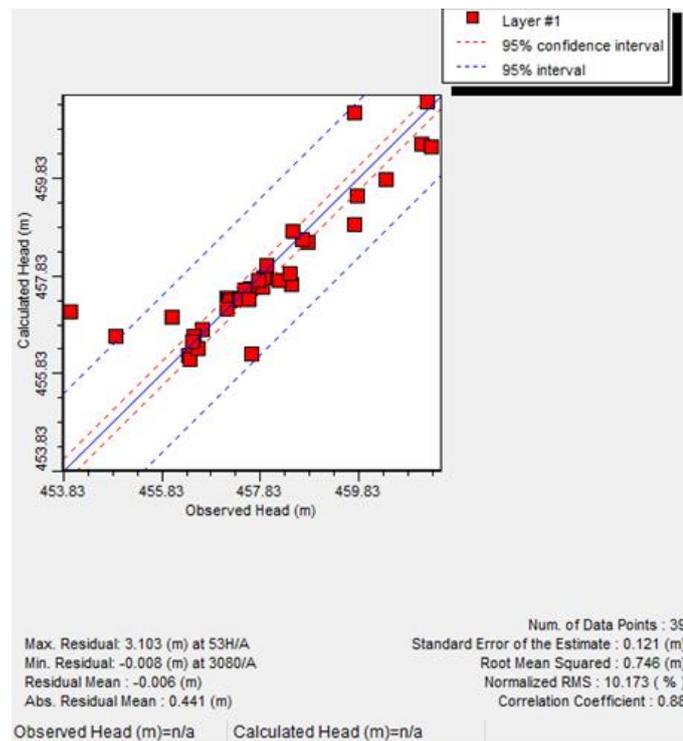


Рисунок 2.3 – Сопоставление фактических (на 12.08.22) и модельных уровней по 39 наблюдательным скважинам

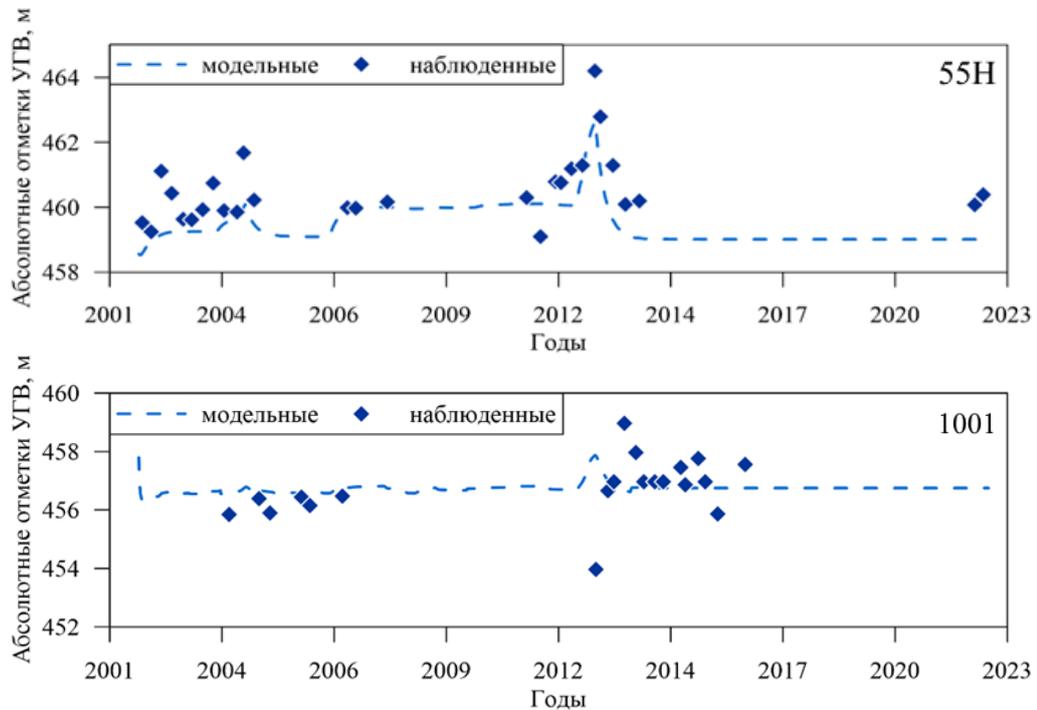


Рисунок 2.4 – Сопоставление фактических и модельных уровней по наблюдательным скважинам 55Н и 1001

Модельная структура потока подземных вод под площадкой БЦБК для профиля, проходящего через здание ТЭЦ к озеру Байкал, приведена на Рис. 2.5.

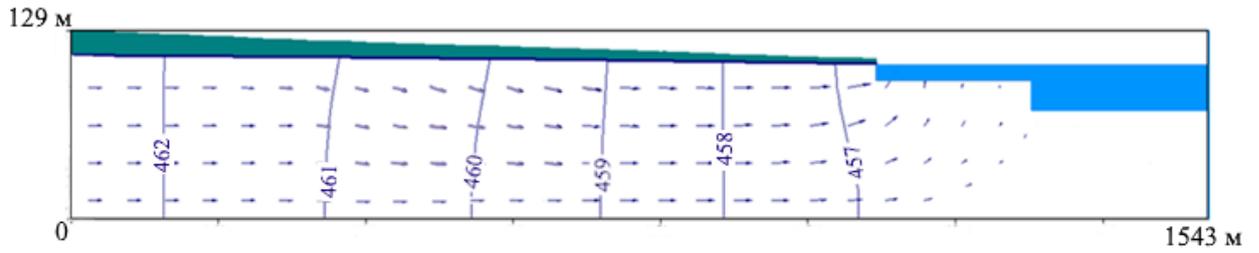


Рисунок 2.5 – Модельная структура потока подземных вод под площадкой БЦБК (линии равных напоров и вектора скоростей) для профиля, проходящего через здание ТЭЦ к озеру Байкал

2.4. Моделирование массопереноса консервативного вещества

В качестве консервативного (нейтрального) вещества, не вступающего во взаимодействие с породой, её обменным комплексом и не распадающегося в процессе миграции по территории предприятия, с некоторыми допущениями, будет рассматриваться суммарное содержание растворенных минеральных компонентов, характеризующееся показателем минерализации подземных вод. Возможность рассматривать этот показатель в качестве консервативного основывается на предпосылке неизменности суммарного содержания растворенных макрокомпонентов состава воды в связи с небольшим, с точки зрения геологических процессов, масштабом миграции – рассматриваемая часть потока подземных вод менее двух километров, также, ввиду, в целом, невысоких температур изучаемого участка, которые способствуют ингибированию химических реакций.

В работе [Шенькман, 2016] приводятся результаты определения всех макрокомпонентов состава подземных вод территории предприятия, после отбраковки из этих данных опробований, где ошибка в электронейтральности состава превышала 1,6 мгЭкв/л, был проведен корреляционный анализ между минерализацией и концентрациями макрокомпонентов, который показал что для самых интенсивных контаминантов-макрокомпонентов по данным [Бейм, 2003] (Рис. 1.12) ионов гидрокарбоната и натрия коэффициент корреляции принимает значение 0,8, для сульфатов – 0,4 (объясняется применением в технологическом цикле диоксида серы), что позволяет предположить, что изменение их распределения в подземных водах будет весьма близко к изменению минерализации.

Также, стоит отметить, что имеющаяся база данных мониторинга состава подземных вод, характеризуется наибольшей наполненностью в площадном и временном отношении по показателю минерализации, что является еще одним немаловажным фактором выбора именно этого показателя для исследования миграции консервативного вещества. Расчеты, основанные на модели массопереноса (п. 2.1), проводились с помощью кода MT3DMS [Zheng, Wang, 1999].

Геомиграционная схематизация

Фоновое значение минерализации подземных вод, поступающих со стороны водораздела, принималось равным 100 мг/л (п. 1.1.4.). Минерализация в местах утечек варьировалась от 400 до 800 мг/л (карта №11) и от 1000 до 10000 мг/л (участок между главным корпусом и ТЭЦ). В работе было принято, что источники загрязнения связаны с отдельными участками, где концентрация загрязняющих веществ в инфильтрационном питании превышает фоновую. Концентрация и режим поступления контаминантов в таких

источниках находилась в ходе калибрации модели, при этом максимальное значение определялось согласно данным мониторинга состава ближайшей скважины, расположенной ниже по потоку от источника.

Активная пористость была принята равной 0,25, что соответствует диапазону характерных значений этого параметра для песчаных пород [Румынин, 2020].

Продольная дисперсивность варьировалась от 1 до 300 м, согласно характерным значениям, соответствующим масштабу массопереноса на территории БЦБК (п. 2.1.). При этом, согласно выражению (2.4), значение параметра продольной дисперсивности, рассчитанное при коэффициентах, приведенных в работе [Schulze-Makuch, 2005] и подобранных на основе экспериментальных данных высшей категории надежности для неконсолидированных осадочных пород (представленных разнозернистыми песками, гравием, глиной, пылеватыми отложениями), составило 3 м для длины пути миграции 500 м и 4 м для длины пути миграции 1000 м. Значение параметра поперечной дисперсивности в горизонтальном и вертикальном направлении принималось на порядок меньше значения параметра продольной дисперсивности (п. 2.1.).

В качестве начального условия в верхних пяти слоях модели (верхние 60 м) принималась минерализация по данным мониторинга (Рис. 1.14). В нижнем слое (от 60 до 100 м) принималась фоновая минерализация.

Вычислительная схематизация соответствует описанной в п. 2.3. Эпигнозные расчеты на период 7528 сут позволяют воспроизвести наиболее полный массив данных с результатами мониторинга состава и свойств подземных вод.

Результаты геомиграционных расчетов и калибрации модели

Количественная оценка сопоставления результатов расчетов с данными мониторинга проводилась путем сравнения значений нормализованных среднеквадратических ошибок (НСКО), определяемых согласно выражению (2.10), приведенному в п. 2.3., и позволяющих оценить относительное соотношение модельных и наблюдаемых значений.

Калибрация концентрации растворенных минеральных веществ в выделенных источниках загрязнения проводилась путем анализа данных мониторинга в ближайших скважинах, расположенных ниже по потоку подземных вод. В ходе калибрации модели минерализация в источнике загрязнения, связанном с картой №11 установлена на значении 400 мг/л; минерализация в источнике между ТЭЦ и главным корпусом БЦБК до закрытия предприятия – 1500-4000 мг/л, а после закрытия – 1500 мг/л.

Калибровка модели переноса растворенного минерального загрязнения производилась в два этапа – в первую очередь, был определен режим и интенсивность выделенных источников загрязнения для достижения нормализованной ошибки менее 20% при сопоставлении наблюдаемых и расчетных значений; далее, производилась калибровка по параметру продольной дисперсности. В результате, наименьшая ошибка получена при значении параметра активной пористости – 0,2 и значении параметра продольной дисперсности – 4 м (Рис. 2.6), которое соответствует расчетному значению этого параметра при характерной для данного объекта длине пути миграции растворенного компонента, полученному по эмпирической зависимости, предложенной в работе [Schulze-Makuch, 2005].

Решение задачи моделирования миграции консервативного мигранта показало достаточную сходимость с массивом фактических данных (по значению минерализации), с диапазоном изменения НСКО на весь период эвригностных расчетов – 12,3-15,7%.

Существенные диапазоны изменения минерализации, по-видимому, обусловлены неравномерной работой перехватывающего водозабора (Рис. 2.2) и непредсказуемой интенсивностью источников загрязнения.

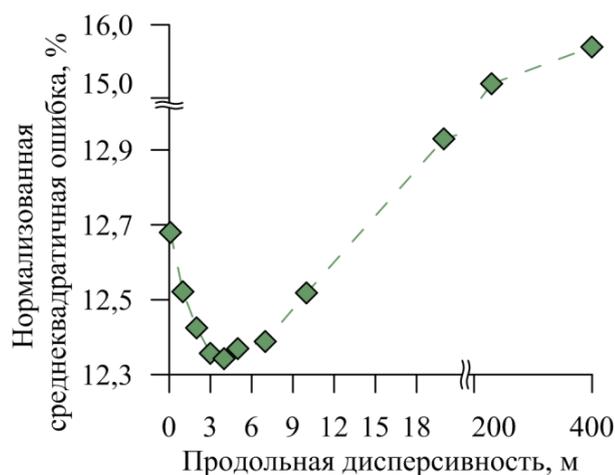


Рисунок 2.6 – График сопоставления нормализованных среднеквадратических ошибок с принятым значением продольной дисперсности для модели массопереноса консервативного вещества

Для иллюстрации результатов эвригностного моделирования (Рис. 2.7) выбраны достаточно представительные данные по наблюдательной скважине 2010, ввиду ее близкого расположения ко всем скважинам перехватывающего водозабора, которые в процессе работы сформировали зону захвата с привлечением подземных вод, находящихся под воздействием всех источников загрязнения (Рис. 1.14).

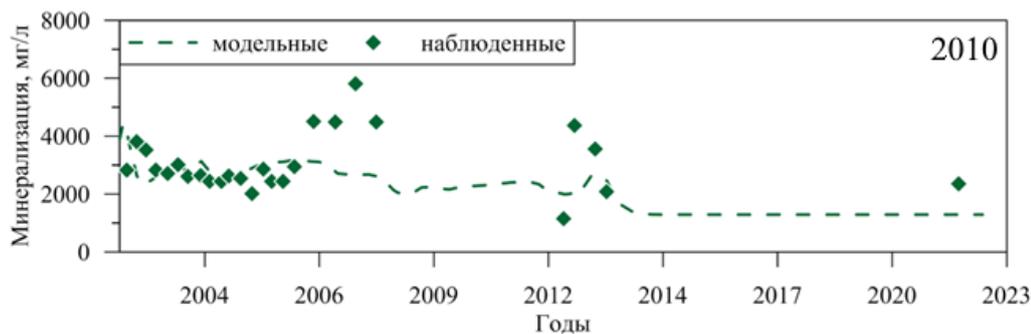


Рисунок 2.7 – Сопоставление модельных и наблюдаемых данных по минерализации подземных вод для скважины 2010

Сопоставление количества растворенных минеральных веществ, поступивших с инфильтрационным питанием в подземные воды территории БЦБК, с количеством, перехваченным водозабором, а также с суммарным количеством растворенных минеральных веществ, разгрузившихся в озеро (за вычетом фонового количества растворенных минеральных веществ, поступающих с области питания водоносного комплекса на западной границе) приведено на Рис. 2.11. Можно отметить, что после прекращения производственной деятельности на предприятии, приращение массы растворенных минеральных веществ, обусловленное инфильтрационным питанием – сократилось, как и количество, перехваченное водозабором (ввиду его остановки). Также можно отметить, уменьшение приращения массы растворенных минеральных веществ, разгружающихся в озеро Байкал, что может быть связано с оптимизацией производственной схемы предприятия, проводимой до его закрытия, однако далее происходит заметный рост, связанный, по-видимому, с отсутствием необходимых мер по консервации производственных систем предприятия. За весь период балансовых расчетов, отмечается, что суммарное поступающее минеральное загрязнение примерно в равных долях разгружается в озеро и перехватывается при водоотборе. При этом, как можно отметить на Рис. 2.9, на начальном этапе преобладает расход разгрузки растворенных минеральных веществ в озеро, а перед остановкой БЦБК (и, соответственно, перехватывающего водозабора), преобладает перехват растворенных минеральных веществ при водоотборе, остановка которого вызывает рост разгрузки растворенных минеральных веществ в озеро.

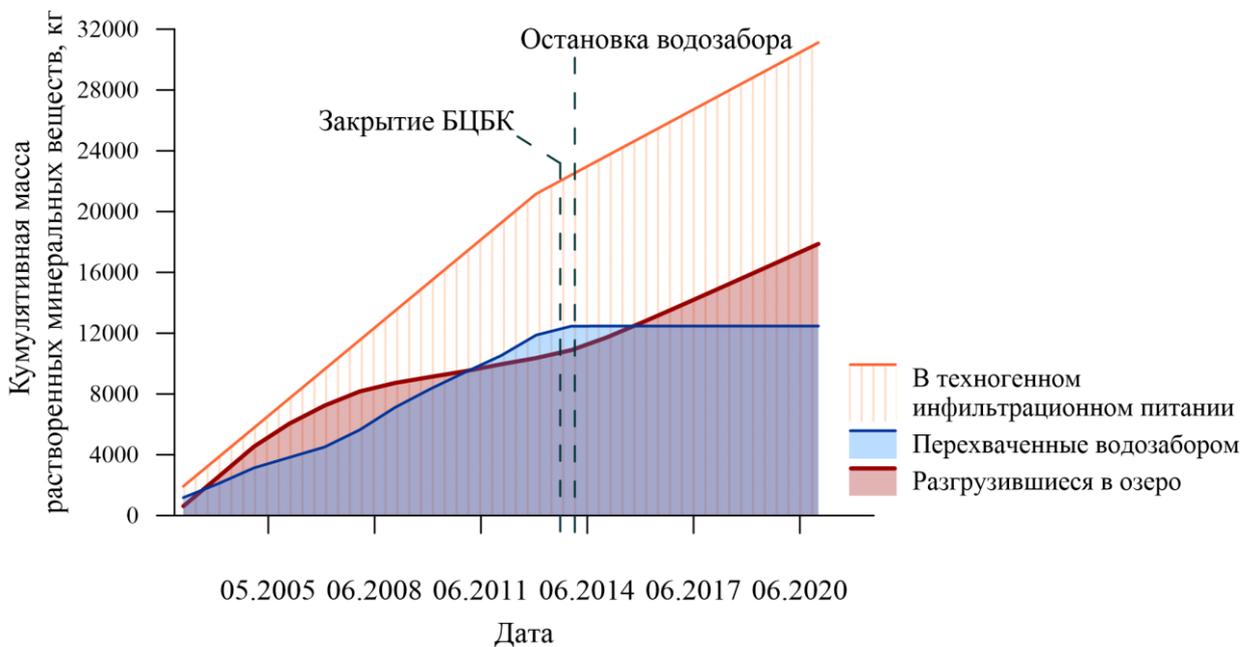


Рисунок 2.8 – Сопоставление расчетных значений массы растворенных минеральных веществ в подземных водах площадки БЦБК

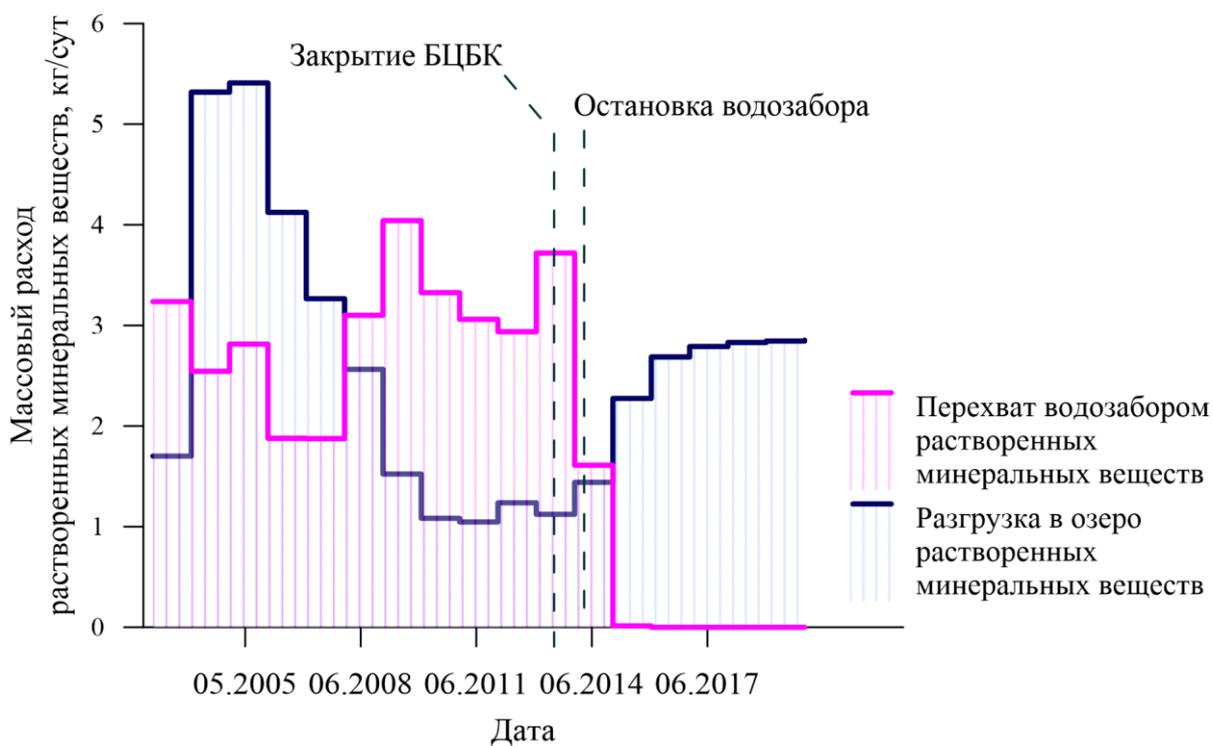


Рисунок 2.9 – Сопоставление расчетных значений разгрузки растворенных минеральных веществ в подземных водах площадки БЦБК

Ввиду того, что результаты эпигнозного моделирования удовлетворительно воспроизводят массив фактических данных по распределению растворенного консервативного мигранта в подземных водах, были выполнены прогнозные расчеты.

На основании факта, что, на данный момент, отсутствует утвержденная программа реабилитации территории, а предсказать интенсивность и концентрацию источников поступления загрязнения не представляется возможным, прогнозные расчеты производились, при реализации «отключения» источников, в постановке, при которой, в результате реабилитационных мероприятий, источники консервативного контаминанта будут полностью извлечены вместе с загрязненными грунтами, что является достаточно частой производственной практикой.

Прогнозные расчеты проводились для двух вариантов: первый заключался в сохранении текущей ситуации на территории предприятия; а второй – в извлечении источников поступления загрязнения в подземные воды. Для каждого из вариантов сделан прогноз без запуска водоотбора, а также с учетом работы наиболее эффективных, по данным работы [Расторгуев, Куранов, 2002], скважин перехватывающего водозабора (скв. 2006 – 433 м³/сут, скв. 2010 – 458 м³/сут, скв. 3001 – 660 м³/сут, скв. 3002– 430 м³/сут, скв. 3003 – 400 м³/сут).

При рассмотрении первого варианта реабилитации территории, было отмечено, что разгрузка растворенных минеральных веществ в озеро не достигнет фоновой значения (ввиду консервативности загрязнения) и будет превышать его на ~35%. При этом при работающем перехватывающем водозаборе, разгрузка в озеро сократится на 20% в первые три года и будет на 30% ниже, чем без водоотбора, но тем не менее будет на 15% выше, чем фоновая разгрузка (Рис. 2.10). Кумулятивная масса разгрузившихся минеральных веществ будет ниже на ~20%, чем в варианте без водоотбора (Рис. 2.11).

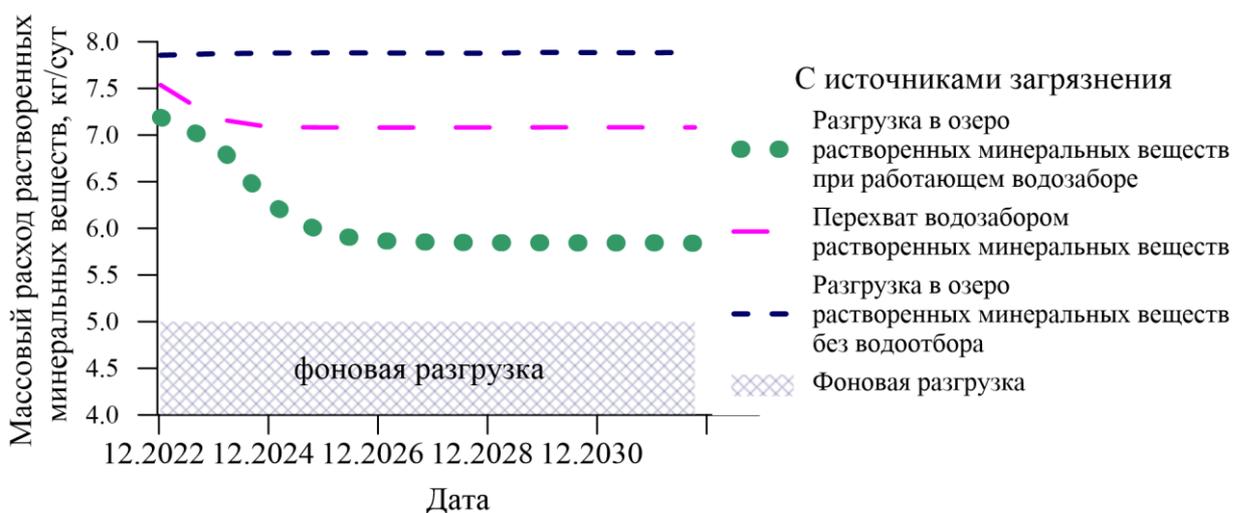


Рисунок 2.10 – Сопоставление вариантов прогнозной разгрузки растворенных минеральных веществ с источниками загрязнения

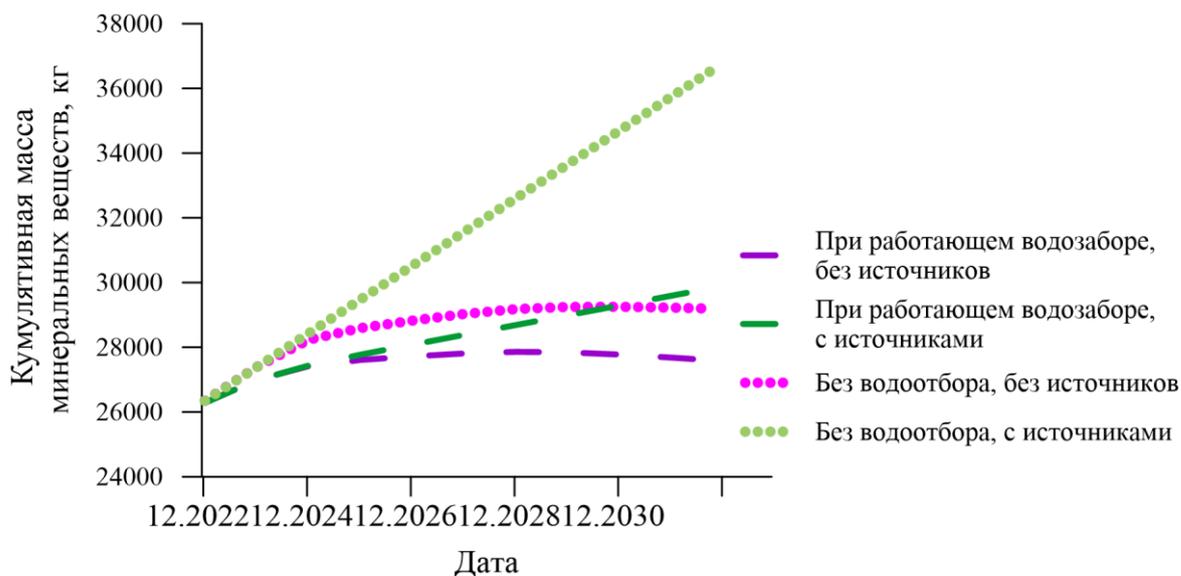


Рисунок 2.11 – Сопоставление прогнозных расчетных значений массы растворенных минеральных веществ разгрузившихся в озеро Байкал (за вычетом фоновой разгрузки)

В результате прогнозного моделирования для второго варианта реабилитации территории, было выявлено что, при условии устранения источников поступления минерального загрязнения, подземные воды территории БЦБК придут к фоновым значениям по значению минерализации по истечении 800 суток. Разгрузка в озеро на уровне фоновых значений будет по истечении ~8 лет, при этом, при функционирующем водозаборе прекращение потока техногенных минеральных веществ наступит на год раньше (Рис. 2.12). Кумулятивная масса разгрузившихся минеральных веществ будет ниже на ~5%, чем в варианте без водоотбора (Рис. 2.11).

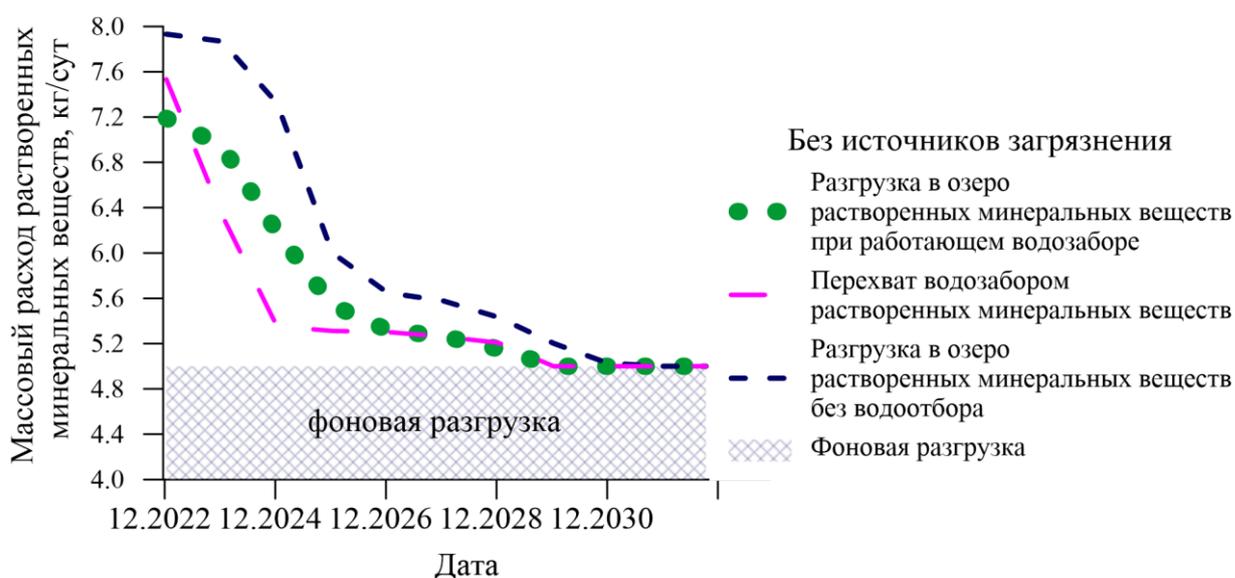


Рисунок 2.12 – Сопоставление вариантов прогнозной разгрузки растворенных минеральных веществ без источников загрязнения

2.5. Моделирование массопереноса неконсервативного вещества

В качестве неконсервативного вещества (сорбируемого и распадающегося в процессе миграции) будет рассматриваться содержание растворенных нефтепродуктов в подземных водах. Загрязнение подземных вод территории предприятия растворенными нефтепродуктами, при опробовании в 2020-2021 годах соответствовало «чрезвычайной экологической ситуации» (п. 1.2.).

Имеющаяся база данных мониторинга состава и свойств территории БЦБК характеризуется наибольшей наполненностью в площадном и временном отношении по показателю содержания растворенных нефтепродуктов. Также корреляционный анализ содержания растворенных нефтепродуктов с содержанием фенолов показал значение коэффициента корреляции 0,9, что говорит о возможности их поступления в подземные воды из одинаковых источников и последующую совместную миграцию. Расчеты, основанные на модели массопереноса (п. 2.1.), проводились с помощью кода MT3DMS [Zheng, Wang, 1999].

Геомиграционная схематизация

Моделирование миграции растворенных нефтепродуктов производилось на основе разработанной и откалиброванной геофильтрационной модели (п. 2.3.). Для этого, в ранее установленные источники повышенного техногенного инфильтрационного питания задавалась следующая концентрация растворенных нефтепродуктов – 0,01-1,8 мг/л в источнике, выделенном в карте №11 и 0,6-15,0 мг/л на площадке между главным корпусом БЦБК и ТЭЦ, на основе имеющихся данных мониторинга. В качестве начального условия в верхних пяти слоях модели (верхние 60 м) принималось распределение концентраций нефтепродуктов, полученное в ходе экстраполяции данных мониторинга за 2002 г. (Рис. 1.18). В нижнем шестом слое (от 60 до 100 м) нефтепродукты не задавались, ввиду отсутствия данных о наличии загрязнения на этих глубинах.

Активная пористость была принята равной 0,2, продольная дисперсивность задавалась 4 м, согласно откалиброванной ранее модели переноса консервативного контаминанта. Поперечная дисперсивность в горизонтальном и вертикальном направлении принималась на порядок меньше продольной. Коэффициент сорбционного распределения – 0,01 л/кг, константа биоразложения – 0,001 сут⁻¹ [Сорокоумова, Расторгуев, 2023].

Вычислительная схематизация соответствует описанной в п. 2.3. Эпигнозные расчеты на период 7528 сут, что позволяет воспроизвести наиболее полный массив данных с результатами наблюдений за уровнем подземных вод и содержанием растворенных нефтепродуктов.

Результаты геомиграционных расчетов и калибровки модели

В ходе калибровки модели устанавливались положение, интенсивность и концентрация в источниках поступления растворенных нефтепродуктов в подземные воды.

Сопоставление результатов мониторинга подземных вод на территории предприятия в разные годы свидетельствует о наличии нефтяного загрязнения, и, возможно, действующих источников загрязнения в настоящее время (уже после остановки производственной деятельности на предприятии). Установление возможных источников поступления нефтепродуктов в подземные воды проводилось путем анализа данных мониторинга, схемы инфраструктуры предприятия (п. 1.2.) и спутниковых снимков, в ходе которого определялись потенциальные объекты-первоисточники загрязнения. Схема расположения выделенных источников представлена на Рис. 2.13, их параметры приведены в Табл. 2.1. Калибровка интенсивности поступления растворенных нефтепродуктов от источников загрязнения начиналась от источников, расположенных выше по потоку подземных вод, и проводилась путем анализа данных мониторинга подземных вод в ближайших скважинах и подбора значений концентрации растворенных нефтепродуктов в техногенной инфильтрации.

Так, полученные в ходе калибровки модели диапазоны изменения концентрации растворенных нефтепродуктов позволяют оценить поток контаминантов с территории предприятия в следующем диапазоне – 0,5-20,6 кг/год.

Графическое представление откалиброванных параметров источников № 1 и 2 приведено на Рис. 2.14, можно отметить, что максимальные (для источников) концентрации растворенных нефтепродуктов характерны в течение относительно недолгих периодов времени, и соответствуют, скорее «розливам», чем постоянным значительным утечкам, что и объясняет небольшую итоговую разгрузку этого контаминанта в воды озера Байкал.

Количественная оценка сопоставления результатов расчетов с данными мониторинга проводилась путем сравнения значений нормализованных среднеквадратических ошибок (НСКО), определяемых согласно выражению (2.15), приведенному в п. 2.3., и позволяющих оценить относительное соотношение модельных и наблюдаемых значений. Решение задачи моделирования миграции растворенных нефтепродуктов показало достаточную сходимость с массивом фактических данных мониторинга содержания растворенных нефтепродуктов; диапазон изменения НСКО на весь период эпигнозных расчетов составил 15,5-17,3%.

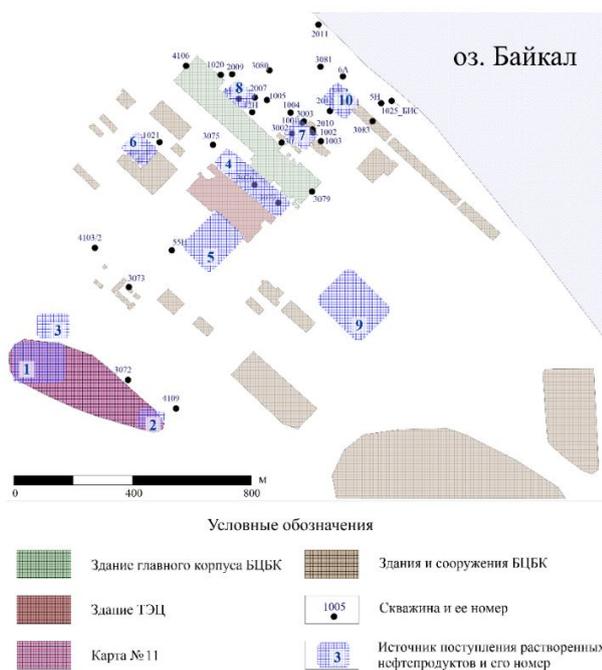


Рисунок 2.13 – Расположение источников поступления растворенных нефтепродуктов в подземные воды площадки БЦБК

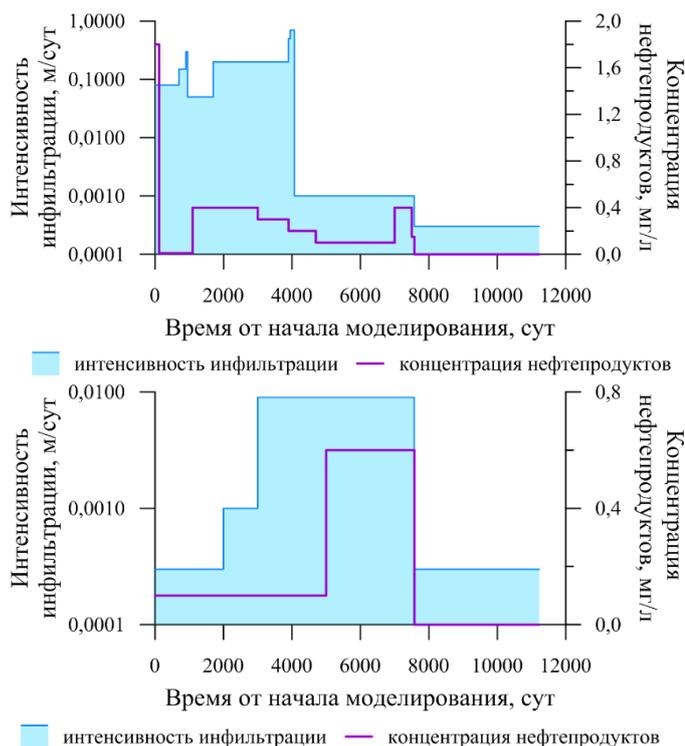


Рисунок 2.14 – Интенсивность и концентрация растворенных нефтепродуктов, поступающих из источников № 1, 2 (Рис. 2.13, Табл. 2.1)

Таблица 2.1 – Концентрация нефтепродуктов и расход техногенной инфильтрации в источниках поступления загрязнения (Рис. 2.13), установленные в результате калибровки модели

№ п/п	Название источника загрязнения	Площадь источника, тыс. м ²	Концентрация нефтепродуктов, мг/л	Интенсивность техногенной инфильтрации, м/сут
1	Север карты № 11	25,9	0,01-1,8	0,001-0,7
2	Юг карты № 11	54,1	0,8	0,001-0,009
3	Гараж тяжелых механизмов	16,7	0,01-1,8	0,001-0,7
4	Площадка между главным корпусом БЦБК и ТЭЦ	10,3	0,6-15,0	0,001-0,009
5	Хранилище угля ТЭЦ	25,6	0,7	0,001
6	Открытое распределительное устройство-220кВ	6,4	1,0	0,130
7	Узел приема и разгрузки химикатов	5,4	0,7-4,0	0,001
8	Склад реагентов	8,3	0,70	0,0005
9	Склад горюче-смазочных материалов и легковоспламеняющихся жидкостей	49,0	1,0	0,001
10	Склад карбида	4,1	0,5-2,0	0,0005

Проведенные расчеты показали удовлетворительное совпадение фактических и модельных выходных кривых по содержанию растворенных нефтепродуктов (Рис. 2.15). Существенные диапазоны изменения концентраций растворенных нефтепродуктов, по-видимому, обусловлены неравномерной работой перехватывающего водозабора (Рис. 2.2) и нестабильной интенсивностью источников загрязнения (Рис. 2.14).

Для иллюстрации результатов эпигнозного моделирования выбраны данные достаточно представительных рядов мониторинга состава подземных вод по наблюдательной скважине 55Н, ввиду ее центрального положения на изучаемой

территории (Рис. 2.13), а также отражения свойств ленты тока подземных вод, формирующейся под влиянием выделенных источников загрязнения 1-3, 5 (Рис. 2.13, Табл. 2.1). Выбор скважины 1001 обусловлен ее близостью к скважинам перехватывающего водозабора, которые в процессе работы сформировали зону захвата с привлечением подземных вод, находящихся под воздействием других источников загрязнения 4, 6-10 (Рис. 2.13, Табл. 2.1).

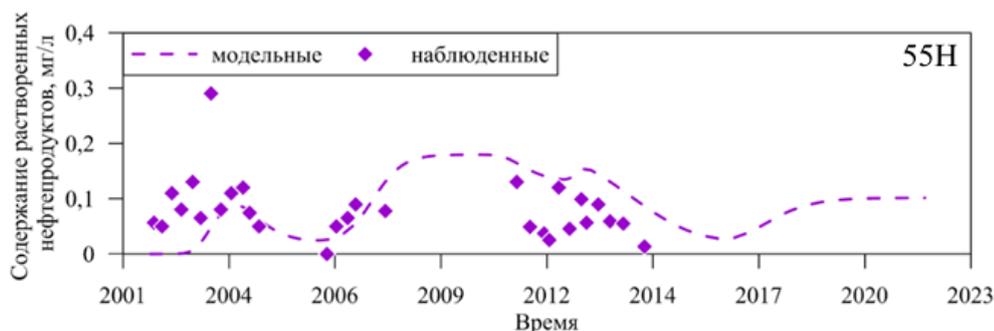


Рисунок 2.15 – Сопоставление модельных и наблюдаемых данных по содержанию растворенных нефтепродуктов для скважины 55Н

Сопоставление количества растворенных нефтепродуктов, поступивших с инфильтрацией в подземные воды территории БЦБК, с количеством разложившихся в горизонте подземных вод, с суммарным количеством растворенных нефтепродуктов, перехваченных при водоотборе, а также с суммарным их количеством, разгрузившимся в озеро Байкал, приведено на Рис. 2.16. Можно отметить, что после остановки производственной деятельности на предприятии, скорость поступления растворенных нефтепродуктов заметно снизилась, после 2018 года (спустя 5 лет после закрытия комбината), скорость поступления растворенных нефтепродуктов с инфильтрацией вновь возросла, что может свидетельствовать о коррозии незаконсервированных емкостей и трубопроводных систем. Помимо этого, Рис. 2.16 иллюстрирует, что основной вклад в уменьшение количества растворенных нефтепродуктов в подземных водах территории БЦБК вносится за счет процессов разложения, однако параметры этого процесса, применяемые при моделировании, взяты, согласно опубликованным данным, поэтому, для оценки реальной доли процессов биоразложения в исследуемом водоносном горизонте, требуется оценка этих параметров непосредственно на объекте. Также можно отметить, что около 10% всех растворенных нефтепродуктов, поступивших с инфильтрационным питанием в водоносный горизонт, разгрузилось, в итоге, в озеро, при этом, в перехватывающий водозабор попало лишь около 5%. При сопоставлении массового расхода растворенных нефтепродуктов в озеро и в перехватывающем водозаборе Рис. 2.17,

можно отметить, что их величины на период функционирования водоотбора – сопоставимы.

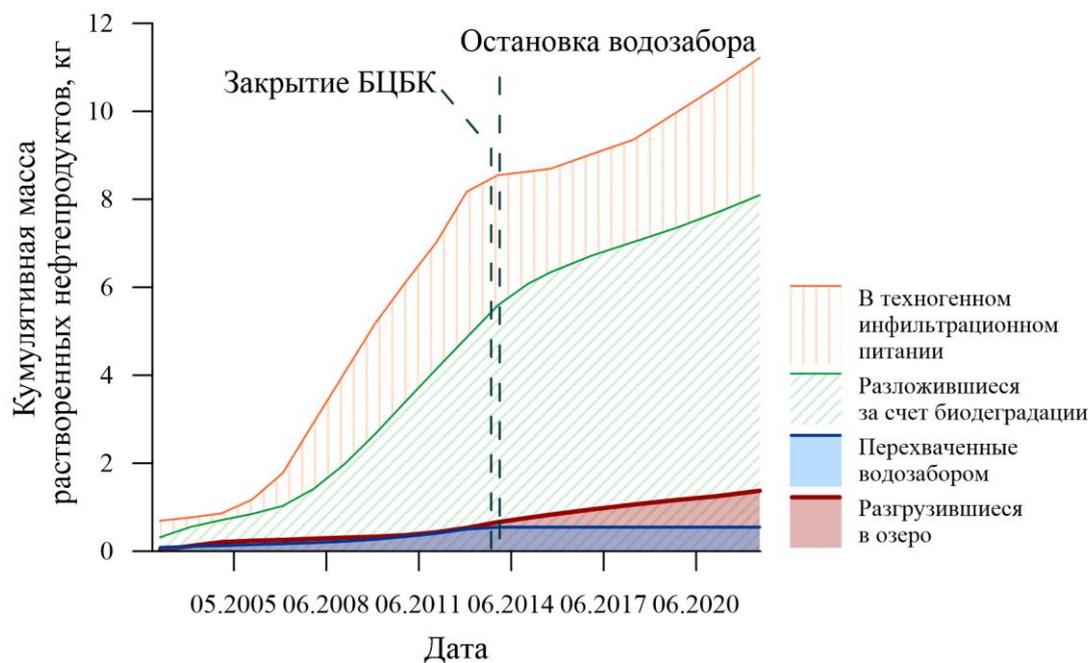


Рисунок 2.16 – Сопоставление расчетных значений массы растворенных нефтепродуктов в подземных водах площадки БЦБК

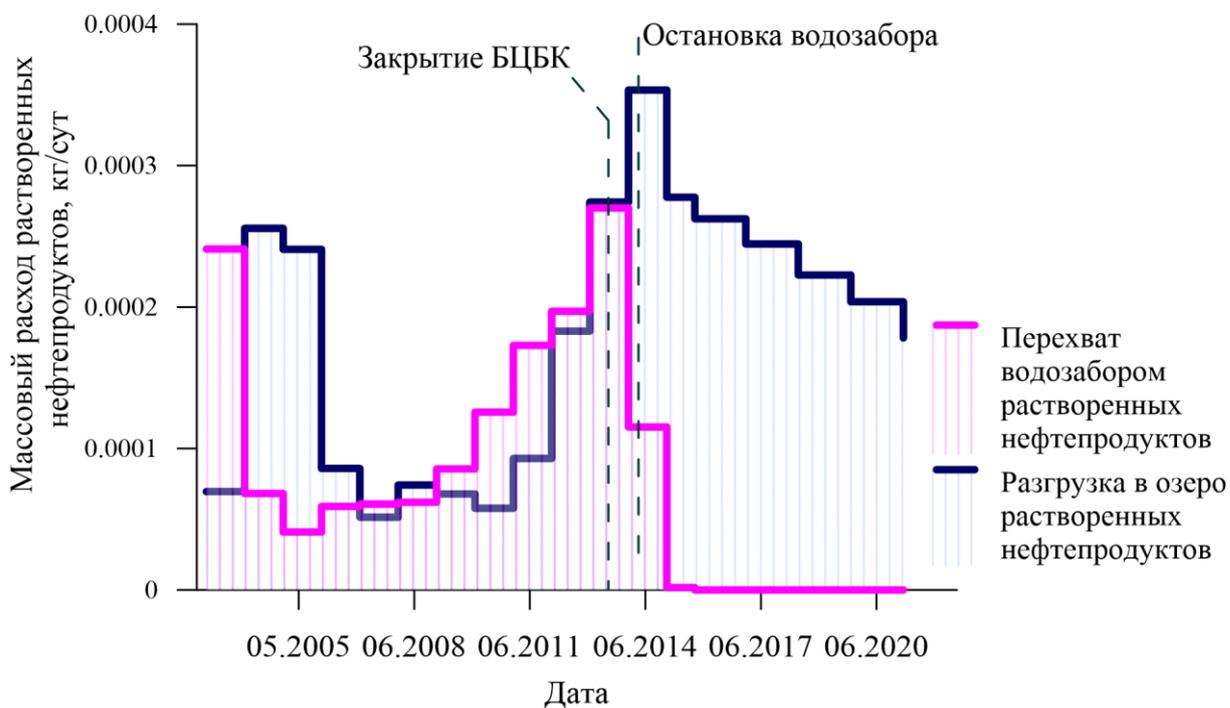


Рисунок 2.17 – Сопоставление расчетных значений разгрузки растворенных нефтепродуктов в районе площадки БЦБК

Также был рассчитан общий объем потенциально загрязненных растворенными нефтепродуктами вод, разгрузившихся в воды озера за весь период эпигнозного моделирования (~20 лет), так, исходя из массового баланса разработанной модели, с учетом жёсткого норматива на содержание растворенных нефтепродуктов в воде (0,05 мг/л) [Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 83...] в воды Байкала могло разгрузиться 32 тыс. м³ загрязненных вод, что составляет 0,0000005 % от объема воды (6342,670 км³ [De Batist et al., 2002]) в Южной котловине озера.

Приведенная ранее информация позволяет признать результаты эпигнозного моделирования удовлетворительно воспроизводящими историю распространения загрязнения в подземных водах территории, соответственно, на основе откалиброванной модели, были выполнены прогнозные расчеты. На данный момент, программа реабилитации территории не утверждена, а предсказать интенсивность и концентрацию источников поступления нефтепродуктов в подземные воды не представляется возможным, поэтому вычисления производились, исходя из предпосылки их «отключения», т.е. предполагается, что, в результате реабилитационных мероприятий, источники, если представляют собой корродированные емкости, будут полностью демонтированы, а также будут извлечены загрязненные грунты, что является достаточно частой практикой для устранения нефтяного загрязнения, поступающего в подземные воды. Для определения объемов грунтов, которые необходимо рекультивировать, требуются дополнительные инженерно-экологические изыскания, которые, насколько известно автору работы, пока не проводились.

Прогнозные расчеты проводились для двух вариантов: первый заключался в сохранении текущей ситуации на территории предприятия; а второй – в извлечении источников поступления загрязнения в подземные воды. Для каждого из вариантов сделан прогноз без запуска водоотбора, а также с учетом работы наиболее эффективных, по данным работы [Расторгуев, Куранов, 2002], скважин перехватывающего водозабора (скв. 2006 – 433 м³/сут, скв. 2010 – 458 м³/сут, скв. 3001 – 660 м³/сут, скв. 3002 – 430 м³/сут, скв. 3003 – 400 м³/сут).

Результаты прогнозного моделирования согласно первому варианту показали, что кумулятивная масса нефтепродуктов, разгрузившихся в озеро, будет на ~15% выше без водоотбора, чем при работающем водозаборе (Рис. 2.16). При этом массовый расход растворенных нефтепродуктов в озеро будет значительно превышать (Рис. 2.19) допустимую разгрузку, согласно установленным нормам для стоков в водные объекты в пределах центральной экологической зоны байкальской природной территории [Приказ

Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 83...]). Работа водозабора поможет заметно сократить разгрузку растворенных нефтепродуктов в озеро в первые два года, однако, ввиду несовершенства сети перехватывающих скважин, относительно выявленных участков загрязнения нефтепродуктами, поступление растворенных нефтепродуктов в озеро продолжится, хоть и с меньшей интенсивностью (Рис. 2.19).

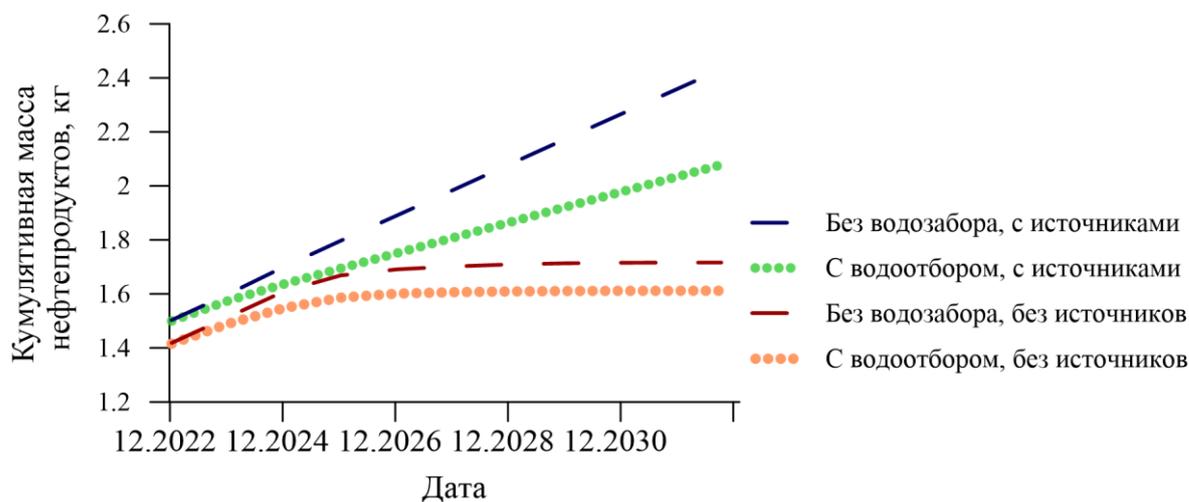


Рисунок 2.18 – Сопоставление прогнозных расчетных значений массы растворенных нефтепродуктов в подземных водах площадки БЦБК и разгрузившихся в озеро Байкал

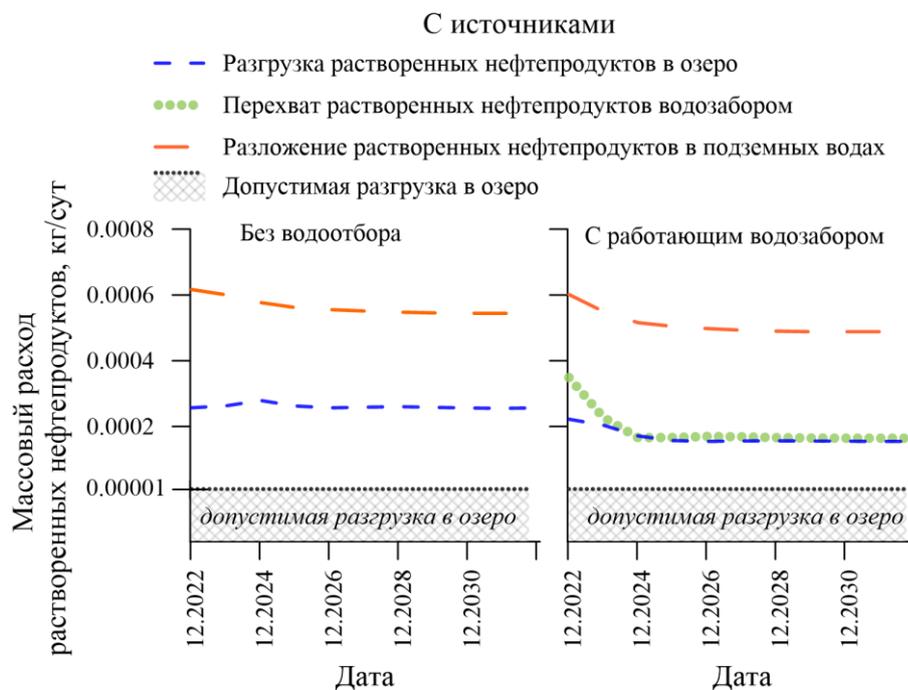


Рисунок 2.19 – Сопоставление вариантов прогнозной разгрузки растворенных нефтепродуктов с источниками загрязнения

В результате прогнозного моделирования, согласно второму варианту реабилитации, было выявлено (Рис. 2.20), что подземные воды территории БЦБК очистятся от растворенных нефтепродуктов без перехватывающего водоотбора (будут соответствовать нормам, установленным для стоков в водные объекты в пределах центральной экологической зоны байкальской природной территории [Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 83...]), по истечении приблизительно четырех лет (1450 сут). При этом половина накопленного в пласте загрязнения уйдет в течение первых 2 лет, в основном, за счет процесса саморазложения (Рис. 2.16, Рис. 2.21). Кумулятивная масса растворенных нефтепродуктов через 10 лет будет на 30% ниже, чем при оставленных источниках. Разгрузка растворенных нефтепродуктов в озеро сократится вдвое по истечении 4,5 лет, а станет ниже установленных норм – через 7 лет (Рис. 2.21).

При запуске перехватывающего водозабора для второго варианта реабилитации территории отмечается, что подземные воды площадки предприятия будут соответствовать нормам, установленным для стоков в водные объекты в пределах центральной экологической зоны байкальской природной территории [Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 83...], по истечении приблизительно трех лет (1100 сут). Разгрузка растворенных нефтепродуктов в озеро сократится вдвое по истечении 2,5 лет, а станет ниже установленных норм раньше, чем случае первого варианта реабилитации – через 5 лет (Рис. 2.21), кумулятивная масса нефтепродуктов, разгрузившихся в озеро, уменьшится на ~5% (Рис. 2.16).

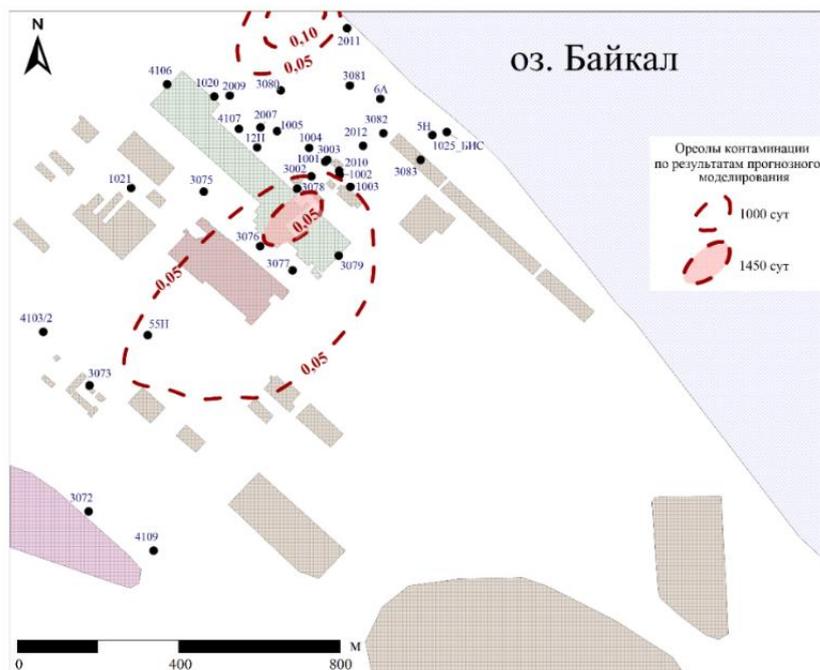


Рисунок 2.20 – Положение прогнозных ореолов загрязнения около трех (1000 сут) и четырех (1450 сут) лет после реабилитационных мероприятий на территории БЦБК

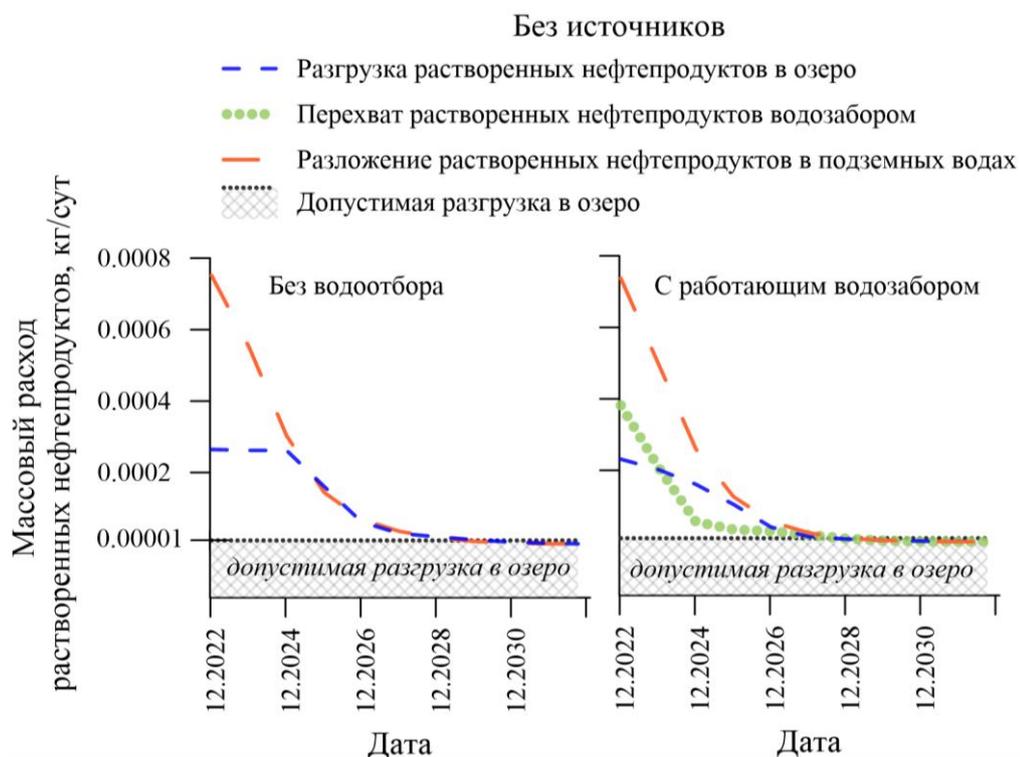


Рисунок 2.21 – Сопоставление вариантов прогнозной разгрузки растворенных нефтепродуктов без источников загрязнения

2.6. Моделирование теплопереноса

Моделирование теплопереноса, учитывая совпадение с точностью до обозначений моделей, приведенных в (п. 2.1.-2.2.) также проводились с помощью кода MT3DMS [Zheng, Wang, 1999], с модификацией вводных параметров массопереноса для решения задач теплопереноса, ввиду совпадения моделей массопереноса и теплопереноса (п. 2.1.-2.2.).

Расчеты теплопереноса осуществлялось на основе описанной в п. 2.3. геофильтрационной модели. Теплоперенос в подземных водах на территории БЦБК за рассматриваемый двадцатилетний период представляет собой нестационарный процесс, ввиду неравномерной работы перехватывающего водозабора, а также – неравномерного поступления нагретых техногенных вод в неоген-четвертичный водоносный комплекс.

Геомиграционная схематизация

На верхней границе модели задавалось инфильтрационное питание постоянной температуры, $9,4^{\circ}\text{C}$, а в выявленные в ходе изысканий в начале 2000-х годов участки повышенного техногенного инфильтрационного питания со значительным увеличением температуры подземных вод задавались источники поступления нагретых вод – от 25°C до 15°C (карта №11) и от 15°C до 8°C (участок между главным корпусом и ТЭЦ) (Рис. 2.22).

На западной границе, где реализовано условие постоянного градиента потока подземных вод, задано условие постоянной температуры – 6°C , соответствующее температуре в области питания водоносного комплекса (п. 1.2.). На восточной границе, приуроченной к берегу озера Байкал задавалась постоянная температура 4°C (округленное до целого числа значение температуры максимальной плотности воды, характерное для придонной воды).

Теплопроводности воды $0,58$ Вт/м/град [Дучков и др., 2023] и породы $2,9$ Вт/м/град – взято среднее значение теплопроводности для пород палеозойского и докембрийского возраста, определенных в работе [Дучков и др., 2023]; плотность и теплоемкость воды равны 1000 кг/м³ и 4186 Дж/кг/град – взяты значения для пресной воды [Купцов, 2008]; теплоемкость породы 800 Дж/кг/град, что соответствует диапазону изменения этого параметра для песков 755 - 3190 Дж/кг/град [Купцов, 2008].

Коэффициент сорбционного распределения для учета теплообмена вода-порода, согласно выражению (2.10) – $0,00019$.

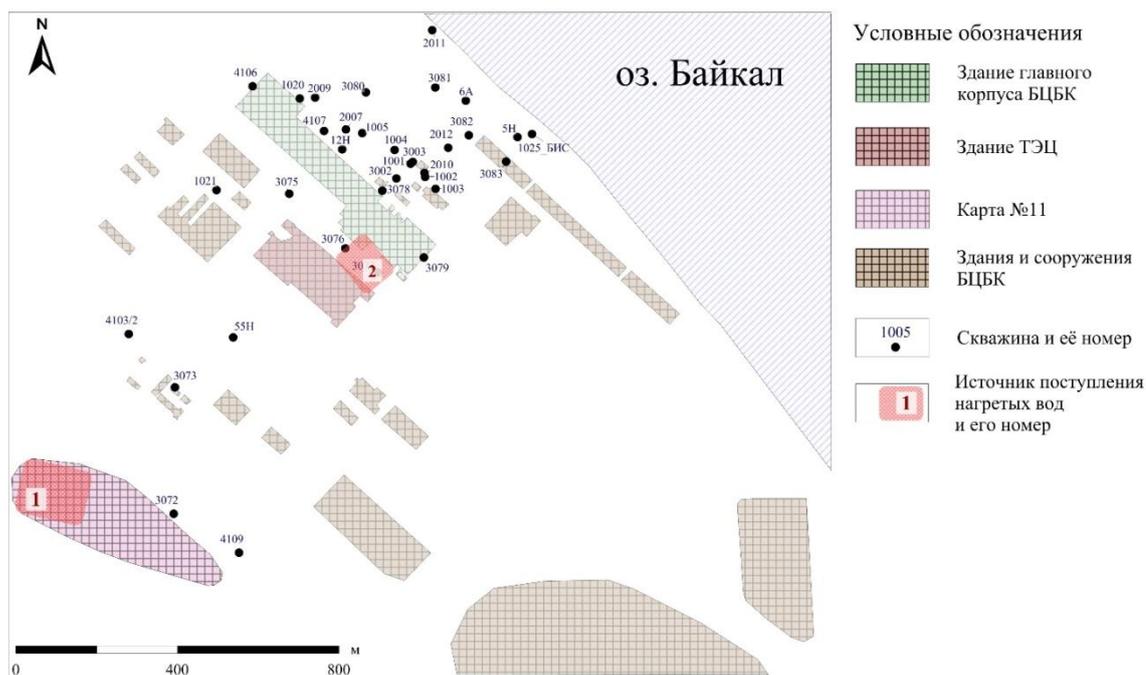


Рисунок 2.22 – Расположение источников поступления нагретых вод в подземные воды площадки БЦБК

В задачах теплопереноса значимую роль играет теплообмен с поверхностью. В модели насыщенной фильтрации, которая реализуется кодом MODFLOW задать теплообмен для безнапорных условий затруднительно, поэтому вертикальная дискретизация была реализована таким образом, чтобы свободная поверхность располагалась чуть выше (на 1 м) подошвы модельного слоя 1. Таким образом, слой 1 близок по мощности зоне аэрации, среднее значение мощности которой $m_a = 10$ м. Мощность следующего модельного слоя принята $\Delta z = 1$ м. В первом модельном слое задавалась постоянная среднегодовая температура поверхности земли, а чтобы учесть изолирующее влияние зоны аэрации между узлами слоя 1 и слоя 2 коэффициент теплопроводности был уменьшен на отношение $\Delta z / m_a = 0,1$ м. Также в верхнем слое задавалось нулевое значение параметра продольной термодисперсивности для описания переноса тепла от/к верхней границы только за счет кондуктивного теплопереноса.

Значения параметра продольной термодисперсивности варьировались от 1 до 300 м, что соответствует диапазону значений этого параметра при длинах пути фильтрации, характерных изучаемому объекту (п. 2.3.). Значение параметра поперечной термодисперсивности в горизонтальном и вертикальном направлении принималось на порядок меньше значения параметра продольной термодисперсивности (п. 2.1.).

Активная пористость была принята равной 0,2 в соответствие с ранее откалиброванной моделью массопереноса консервативного вещества.

В качестве начального условия в верхних пяти слоях модели (верхние 60 м) принималась температура по данным мониторинга на 2002 г. (Рис. 1.15). В нижнем – 6 слое (от 60 до 100 м) принималась фоновая температура 8°C, согласно (Табл. 1.5).

Вычислительная схематизация соответствует описанной в п. 2.3. Эпигнозные расчеты на период 7528 сут, что позволяет воспроизвести наиболее полный массив данных с результатами наблюдений за уровнем и температурой подземных вод.

Результаты геомиграционных расчетов и калибровки модели

Количественная оценка сопоставления результатов расчетов с данными мониторинга проводилась путем сравнения значений нормализованных среднеквадратических ошибок (НСКО), определяемых согласно выражению, приведенному в п. 2.4.

Оценка влияния соотношения продольной и поперечной термодисперсивностей показала низкую чувствительность модели к этому параметру – изменения соотношения на порядок, приводит к изменению значения НСКО на 6,5%. В ходе анализа результатов калибровки модели по параметру продольной термодисперсивности (Рис. 2.23), можно отметить, что при неучете теплообмена с поверхностью, наилучшая сходимость модельных расчетов с наблюдаемыми значениями достигается при значении параметра продольной термодисперсивности – 230 м, при этом, при калибровке модели массопереноса, значение параметра продольной дисперсивности, соответствующее минимальному значению НСКО составило 4 м (Рис. 2.6).

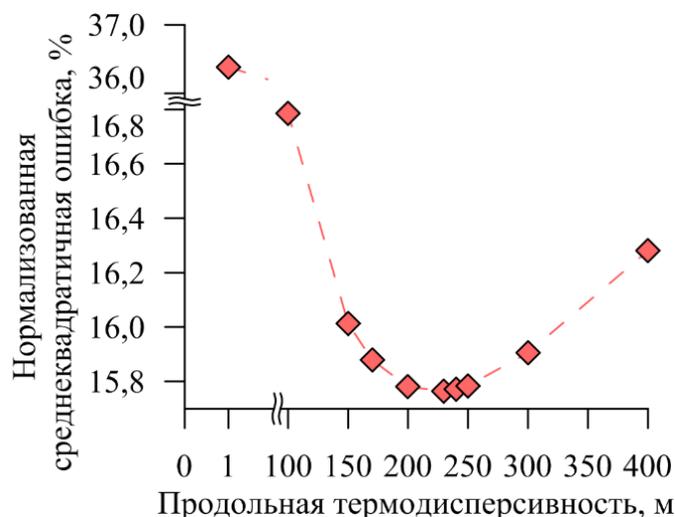


Рисунок 2.23 – График сопоставления нормализованных среднеквадратических ошибок с принятым значением продольной термодисперсивности для модели теплопереноса

Такая существенная разница в значениях параметров продольной дисперсивности и продольной термодисперсивности, по-видимому, обусловлена неучтенными механизмами рассеивания и поступления тепла – оттока тепла за счет кондуктивного теплообмена, например, через кровлю моделируемой области.

Соответственно, для учета оттока тепла через кровлю водоносного горизонта, исходная модель теплопереноса была модернизирована путем задания слоя постоянной температуры на верхней границе модели (за исключением участков поступления нагретых вод). Температура в этом слое задавалась согласно данным о средней годовой температуре поверхности и средней годовой температуре грунтов сезонномерзлого слоя в ближайших населенных пунктах, приведенных в п. 1.1.1. – 0,5°C, 3,2°C, 5,6°C.

Решение задачи тепломассопереноса в новой постановке показало, наилучшая сходимость модельных расчетов с наблюдаемыми значениями достигается при значении параметра продольной термодисперсивности 4 м (Рис. 2.24), что соответствует значению параметра продольной дисперсивности при решении задачи массопереноса консервативного мигранта (Рис. 2.6).

Решение миграционной задачи показало достаточную сходимость с массивом фактических данных по значению температуры подземных вод, со значением нормализованной ошибки для рассмотренных стресс-периодов 23-25%. Сопоставление фактических и модельных температур по наблюдательным скважинам 3003 и 2007 (ниже по потоку от главного корпуса БЦБК) (Рис. 1.15, 2.22) приведено на Рис. 2.25.

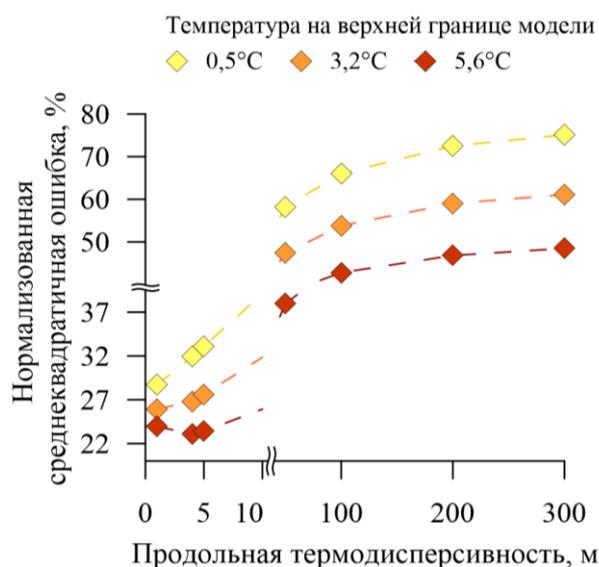


Рисунок 2.24 – Графики сопоставления нормализованных среднеквадратических ошибок с принятым значением продольной термодисперсивности при различных значениях температуры на верхней границе модели

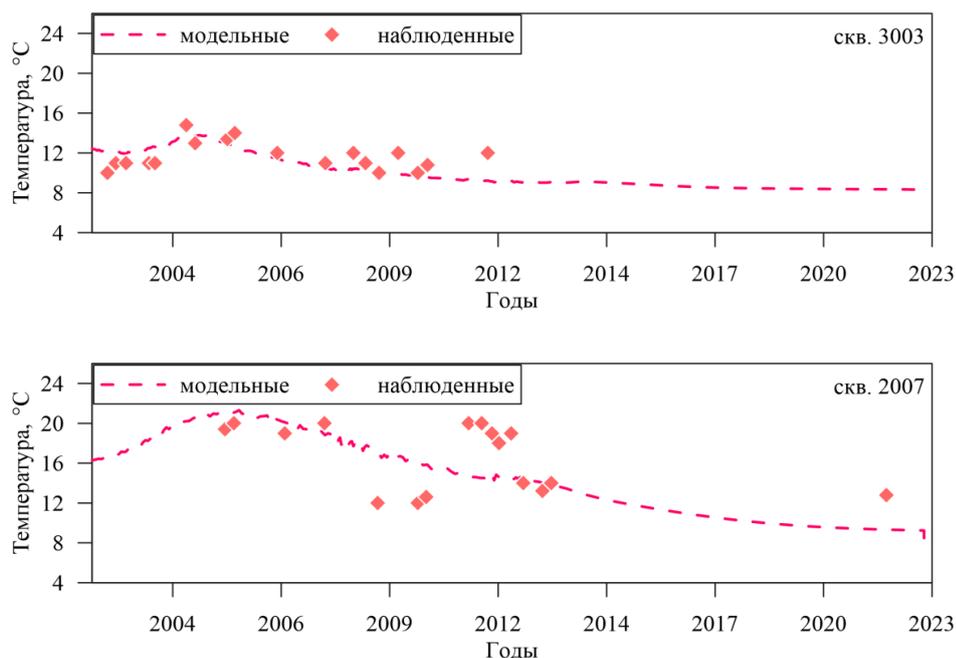


Рисунок 2.25 – Сопоставление модельных и наблюдаемых данных по температуре подземных вод для скважины 3003, 2007

2.7. Выводы к главе 2

1. Разработанная трехмерная геофильтрационная модель с учетом тепло- и массопереноса контаминантов на территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината удовлетворительно воспроизводит имеющиеся данные двадцатилетнего мониторинга неоген-четвертичного водоносного комплекса по уровням подземных вод, по минерализации, по температуре и по содержанию растворенных нефтепродуктов.

2. Установлено положение и режим основных источников теплового загрязнения и растворенного минерального загрязнения на территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината: между зданием ТЭЦ и главным корпусом БЦБК, а также в карте №11.

3. В результате последовательной калибровки моделей массо- и теплопереноса установлено, что для модели тепломассопереноса существенную роль играет теплообмен с кровлей пласта, неучет которого при калибровке модели приводит к завышенному значению параметра продольной термодисперсивности.

4. Перехватывающий водозабор, действовавший на территории предприятия, до закрытия принимал до 50% растворенных минеральных веществ. Соответственно, в настоящее время, без водоотбора, массовый расход растворенных минеральных веществ с территории возрос вдвое. Возможно, в перспективе, из-за уменьшения интенсивности источников загрязнения, массовый расход разгрузки растворенных минеральных веществ

сократится (часто интенсивность источников угасает экспоненциально), однако для численной характеристики этого процесса, необходимо ведение длительного (около 5 лет) регулярного мониторинга. Таким образом, эпигнозные расчеты показывают значимость вклада перехватывающего водозабора и источников загрязнения на разгрузку растворенных минеральных веществ в Байкал.

5. Проведенные прогнозные расчеты для определения распространения минерального загрязнения, реализованные в двух постановках: первая, при которой источники загрязнения остались неизменными; вторая – предусматривала извлечение источников поступления загрязнения, также каждая постанова включала два варианта – с запуском перехватывающего водозабора и без него; показали, что в первой постановке разгрузка растворенных минеральных веществ через 10 лет будет выше фонового значения на 35%, а при работающем перехватывающем водозаборе – на ~15%, при этом, кумулятивная масса разгрузившихся минеральных веществ будет ниже на ~20%, чем в варианте без водоотбора. В результате расчетов согласно второй постановке, показано, что разгрузка растворенных минеральных веществ в озеро достигнет фонового значения спустя 8 лет, при этом, при функционирующем перехватывающем водозаборе, на год раньше, а кумулятивная масса разгрузившихся минеральных веществ будет ниже на ~5%, чем в варианте без водоотбора. Соответственно, наибольший вклад в реабилитацию подземных вод территории от консервативного минерального загрязнения будет внесен за счет устранения источников поступления загрязнения, а дополнительное включение перехватывающего водозабора позволит несколько ускорить процесс очищения подземных вод.

6. В ходе анализа результатов мониторинга содержания растворенных нефтепродуктов в подземных водах и производственной системы БЦБК, было установлено большее количество источников их поступления в подземные воды, чем для случая распространения растворенного минерального загрязнения и тепла. В ходе калибровки разработанной модели массопереноса неконсервативного мигранта в подземных водах территории БЦБК, было установлено положение и режим основных источников поступления нефтепродуктов в подземные воды.

7. Эпигнозные расчеты показали, что основное уменьшение количества растворенных нефтепродуктов в подземных водах территории БЦБК связано с процессами биоразложения, описание которых производилось согласно минимальному из характерных, согласно литературным данным, значению константы деструкции, уточнение этого параметра возможно при проведении регулярного площадного мониторинга. Также, можно

отметить, что около 10% всех растворенных нефтепродуктов, поступивших из источников загрязнения в водоносный горизонт, разгрузились, в итоге, в озеро, при этом, в перехватывающий водозабор попало лишь около 5%. При сопоставлении массового расхода растворенных нефтепродуктов в озеро и в перехватывающий водозабор, можно отметить, что их величины на период функционирования водоотбора – сопоставимы. Массовая разгрузка растворенных нефтепродуктов за двадцатилетний период могла привести к разгрузке 32 тыс. м³ загрязненных вод в озеро Байкал.

8. Проведенные прогнозные расчеты для двух вариантов реабилитации территории показали, что в первой постановке разгрузка растворенных нефтепродуктов через 10 лет будет выше фонового значения на порядок, как и при работающем перехватывающем водозаборе, при этом кумулятивная масса разгрузившихся нефтепродуктов будет ниже на ~15%, чем в варианте без водоотбора. В результате расчетов согласно второй постановке, показано, что разгрузка растворенных нефтепродуктов в озеро достигнет фонового значения спустя 7 лет, при этом, при функционирующем перехватывающем водозаборе, на два года раньше, а кумулятивная масса разгрузившихся минеральных веществ будет ниже на ~5% , чем в варианте без водоотбора. Соответственно, наибольший вклад в реабилитацию подземных вод территории от неконсервативного минерального загрязнения, помимо процессов природного биоразложения, будет внесен за счет устранения источников поступления загрязнения, а дополнительное включение перехватывающего водозабора позволит несколько ускорить процесс очищения подземных вод.

Глава 3. Природные миграционные процессы в акватории озера Байкал

Интересной особенностью озера Байкал является наличие естественных проявлений углеводородов, которые были отмечены местными жителями еще в древние времена, а в XIX веке некоторые выходы нефтей были в разное время описаны Гmeliным И.Г., Георги И.Г., Палласом П.С., Чекановским А.Л. и Черским И.Д. В XX веке исследования проводились более масштабно Верещагиным Г.Ю., Рябухиным Г.Е., Самсоновым В.В., Пономаревой Г.П., Конторовичем А.Э. и многими другими [Конторович и др., 2007].

Природные источники углеводородов в озере Байкал связаны с формирующимися и мигрирующими в этом районе углеводородами, которые, согласно классификации Афоной Т.Е. [Афоной, 2005], подразделяются на эндогенные, связанные с генерацией углеводородов в озере, и экзогенные, обусловленные деятельностью биоты и привнесением веществ поверхностными водотоками.

Можно отметить, что основным, самым интенсивным, экзогенным источником углеводородов, поступающих с водами рек, впадающих в озеро, является река Селенга, которая обеспечивает около половины ежегодного притока воды, органического углерода и углеводородов и других растворенных компонентов [Афоной и др., 2015; Фролова и др., 2017], что закономерно, ввиду значительной площади её водосборного бассейна – 447,06 тыс. км² [Фролова и др., 2017], который включает промышленно-городские агломерации Улан-Удэ, Гусиноозерска, Селенгинска, а также территории Монголии со значительной сельскохозяйственной и промышленной нагрузкой.

В работе [Афоной, 2012] на основании многолетних исследований, основными загрязнителями р. Селенги выделяют нефтепродукты, органические вещества, хлорорганические соединения. Согласно данным [Афоной, 2012], поступление нефтепродуктов с очистных сооружений Улан-Удэ составляет 49,3 т/год, при этом, высокие концентрации растворенных нефтепродуктов наблюдались и выше сброса с очистных сооружений, в том числе и выше по течению от высокоурбанизированной территории столицы республики Бурятия. Доказательством существенного трансграничного притока контаминантов, в частности, нефтепродуктов являются неоднократные превышения ПДК по содержанию растворенных нефтепродуктов в водах р. Селенга (до 15 ПДК), в точке опробования около государственной границы России и Монголии у поселка Наушки [Афоной, 2012]. Приток нефтепродуктов с территории Монголии по оценкам, представленным в работе [Афоной и др., 2015], достигает 3,9 тыс. тонн в год, при этом,

согласно оценке тех же исследователей, суммарное поступление нефтепродуктов с водами Селенги в озеро Байкал составляет до 5,1 тыс. тонн в год. Согласно предпосылке, что основная часть растворенных нефтепродуктов представлена бензолом, ввиду его широкой распространенности и относительно высокой растворимости в воде [Жузе, 1986; Путилина и др., 2019], был произведен пересчет (согласно молярному соотношению в соединении бензола) притока нефтепродуктов по р. Селенга на приток углерода бензола, который составил 4,7 тыс. тонн в год ($4,7 \times 10^6$ кг в год), что, безусловно, представляет завышенную оценку, ввиду притока не только бензола, но и других углеводородов с иным молярным соотношением атомов, однако эти расчеты позволят сравнить долю этого источника относительно других.

Генерация эндогенных углеводородов происходит из осадочных отложений, которые, формируясь в субаквальных условиях, состоят из минеральных частиц, поровой воды, органических веществ и живых организмов. Состав органических веществ весьма неоднороден, зависит от обстановки осадконакопления, на данный момент, в озере Байкал значительным источником ОВ является планктон, продукты разложения которого адсорбируются глинистыми частицами в процессе осадконакопления. В ходе диагенетических процессов происходит погружение донных отложений на большие глубины, где органические вещества вовлекаются в биохимические процессы преобразования, которые приводят к генерации газообразных, жидких и твердых соединений.

Образование метана происходит на этапе диагенеза в ходе биохимических преобразований органического вещества осадочных отложений, а также на этапах катагенеза (где образуется около 82% всего метана) и метаморфизма за счет процессов термokatалитического разложения рассеянного органического вещества, нефти и угля [Хант, 1972]. Согласно гипотезам, предложенным Успенским В.А. и Вассоевичем Н.Б., представленным в работе [Жузе, 1986] главная зона газообразования в разрезе осадочных отложений (Рис. 3.1) находится глубже главной зоны нефтеобразования, при этом максимальное образование метана приурочено к глубинам с температурой, превышающей 120 °С. Представление о максимальной генерации метана на высоких стадиях преобразования вещества подтверждается данными Успенского В.А., согласно которым из 1 тонны угля образуется 33 кг метана на торфяной стадии, 77 кг – на бурогольной, 108 кг – на каменноугольной и 68 кг – на антрацитовой стадии [Жузе, 1986].

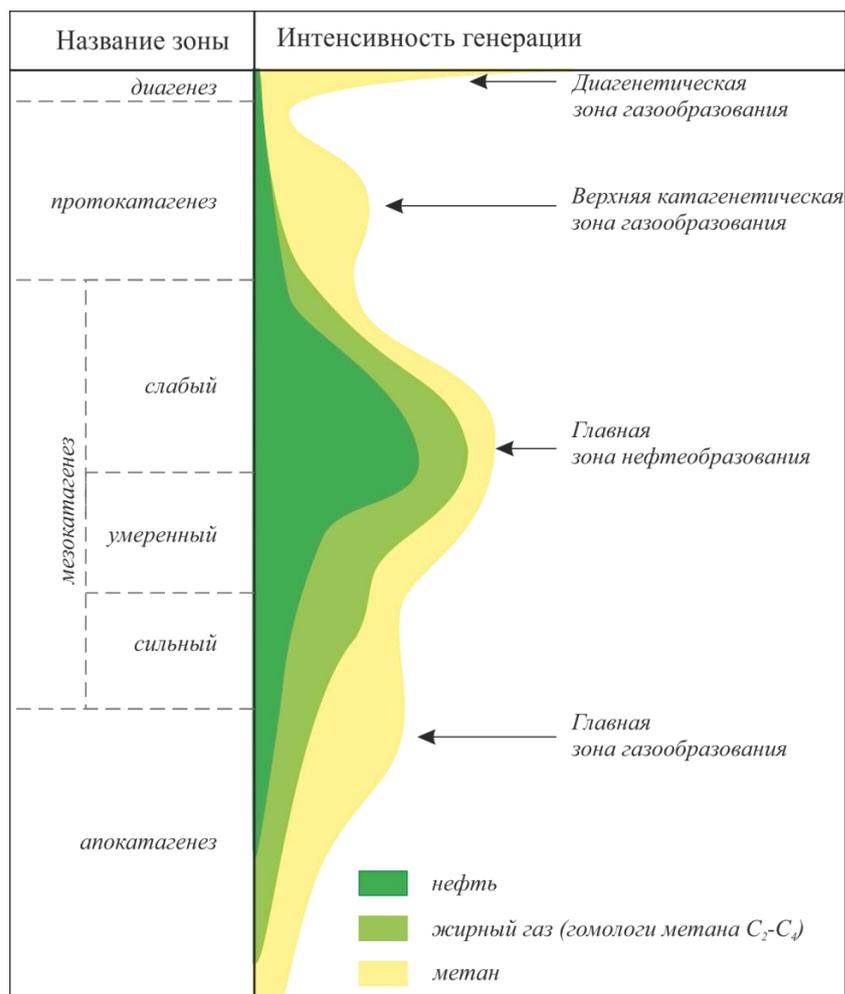


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема вертикальной зональности генерации углеводородов в процессе литогенеза [Жузе, 1986]

Углеводороды, встречающиеся в акватории озера Байкал, представлены разными формами, отличающимися условиями формирования, миграционной способностью, устойчивостью и составом, однако среди них более многочисленны газопроявления [Лозовой, 2012].

Разгрузка нефти в озере Байкал происходит периодически, в результате накапливаются байкальские озокериты (байкериты) и твердые битумы. Соответственно различные углеводороды и продукты их окисления являются частью уникального байкальского биогеоценоза. Исследования проб нефти, разгружающейся сквозь толщу вод озера и донных отложений в 1150 метрах от устья рек Б. и М. Зеленовская (мыс Толстый), показали, что в их составе преобладают углеводороды – 70,5 %, смолы составляют – 22–23 %, асфальтены – 7–8 %, а также отсутствие нормальных алканов, ациклических изопреноидов и монометилалканов, что указывает на воздействие процессов биodeградации [Конторович и др., 2007; Петров, 1984; Jobson, 1979].

С 70-х годов XX века начинает подниматься вопрос о существовании газовых гидратов в донных отложениях озера Байкал, на основании получения газонасыщенных кернов осадков. Факт наличия газовых гидратов установлен в ходе бурения скважины в 1997 году [Кузьмин и др., 1998], которые потом активно исследовались, в том числе и с привлечением глубоководных обитаемых аппаратов "Мир-1" и "Мир-2" и в рамках совместного проекта Class@Baikal геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и ЛИН СО РАН, а также многими другими исследователями [Клеркс и др., 2003; Хлыстов, 2006; Khlystov et al., 2013; Ахманов и др., 2018, Видищева и др., 2021].

Фокусированные выходы углеводородов встречены, например, вблизи станции Танхой, рядом с устьем р. Б. Зеленовской и на траверсе мыса Горевой Утес [Конторович и др., 2007; Хлыстов и др., 2007; Горшков и др., 2010; Павлова и др., 2012; Ахманов и др., 2018; Видищева, 2023]. Исследования разгрузки углеводородов на траверсе мыса Горевой Утёс производились, в том числе в ходе научно-исследовательской экспедиции геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и ЛИН СО РАН – Class@Baikal – 2018 с участием автора диссертационной работы, фотографии зафиксированных нефтепроявлений на поверхности озера и в образцах донных отложений представлены на (Рис. 3.2-3.3). В пределах участка, диаметром около 500 метров, расположенного на глубинах 850-950 метров, отмечается активная разгрузка углеводородов – зафиксированы выходы нефти, газа, а также придонные газовые гидраты, образцы которых были получены при отборе донных отложений с помощью гравитационной трубы-пробоотборника.

Разгрузка углеводородов предположительно связана с генерацией углеводородов в кайнозойских отложениях, источник около мыса Горевой Утес оценивается расходом 3,6-4,0 тонн в год [Конторович и др., 2007; Хлыстов и др., 2007]. Детальное изучение состава углеводородов позволило идентифицировать наличие индикаторных соединений, свидетельствующих о связи как с органическим веществом терригенных, часто угленосных отложений и отвечает окислительным условиями их преобразования в диагенезе, так и органического вещества озерного происхождения [Конторович и др., 2007]. В диссертационной работе Видищевой О. Н. [Видищева, 2023], установлено, что потенциальной нефтегазоматеринской толщей региона могли являться углистые отложения аналога танхойской свиты олигоцен-плиоценового возраста.



Рисунок 3.2 – Аэрофотоснимок природных нефтяных пленок в районе м. Горевой Утес (фото Барымовой А.А. отчет экспедиции Class@Bikal-2018)

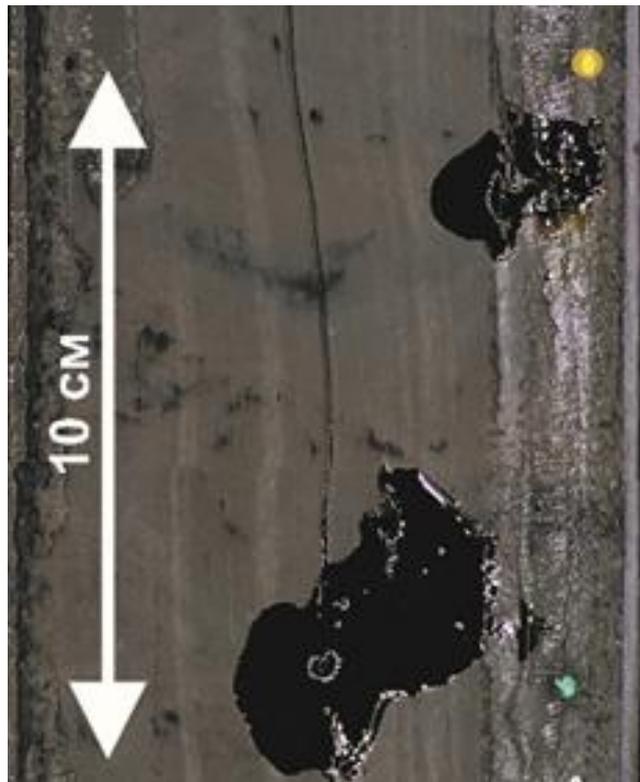


Рисунок 3.3 – Нефтепроявление в образце донных отложений из района мыса Горевой Утес [отчет экспедиции Class@Bikal-2018]

Углеводороды, в том числе и растворенные нефтепродукты, разгружаются в акваторию, при этом экосистема озера в значительной степени адаптирована к ним

и существуют микроорганизмы, осуществляющие биodeградацию углеводородов [Горшков и др., 2010, Павлова и др., 2012, Захаренко, 2015]. В работе [Конторович и др., 2007] отмечается, что степень бактериальной деградации придонной и приповерхностной проб неодинакова – так, в первой отмечается отсутствие нормальных алканов, а вторая – слабо деградирована.

Миграция углеводородов обычно происходит в виде отдельной несмешивающейся с водой фазы, ввиду отличных от воды физико-химических свойств, однако в подземной гидросфере можно выделить следующие формы нахождения углеводородов с различной миграционной способностью – свободная жидкая и газовая фазы; заземленные в поровых менисках; сорбированные на поверхности минеральных и органических частиц; а также – в виде эмульсии и растворенные в воде (Рис. 3.4). Согласно материалам [Хаустов, Редина, 2013; Путилина и др., 2019], основная часть углеводородов приходится на долю сорбированных веществ, эмульгированные могут составлять 22-77%, отдельная пленочная часть – 0,1-7%, растворенная доля – 21-77%. Примеры значений растворимости некоторых углеводородных соединений приведены в Табл. 3.1 и на Рис. 3.5 [Намиот, 1991; Duan, Мао, 2006]. Также стоит отметить возможную миграцию углеводородных соединений со сверхкритическими флюидами (например, углекислый газ, сероводород, гомологи метана), которые выделяют их в виде нефти в областях пониженного давления [Абрамов, Пятаев, 2021].

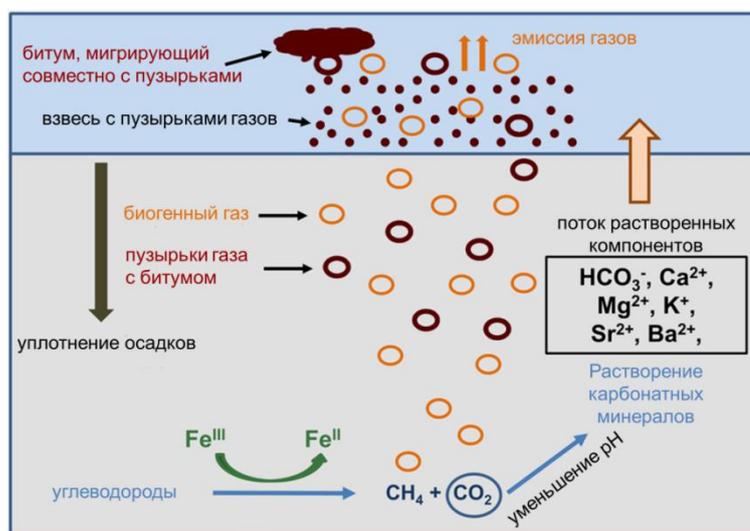


Рисунок 3.4 – Схема миграционных процессов, связанных с разгрузкой углеводородов в донных отложениях [Kuznetsov et al, 2023]

Таблица 3.1 – Данные по растворимости некоторых углеводородов в воде [Жузе, 1986; Путилина и др., 2019]

Соединение	Растворимость, мг/л при $T = 25^{\circ}\text{C}$, $P = 0,1 \text{ МПа}$
Метан	24,4
Этан	60,4
Пропан	62,4
<i>n</i> -Бутан	61,4
<i>n</i> -Пентан	38,5
<i>n</i> -Гексан	9,5
Циклопентан	156,0
Циклогексан	55,0
Бензол	1780,0
Толуол	515,0
Ортоксилол	175,0
Этилбензол	152,0

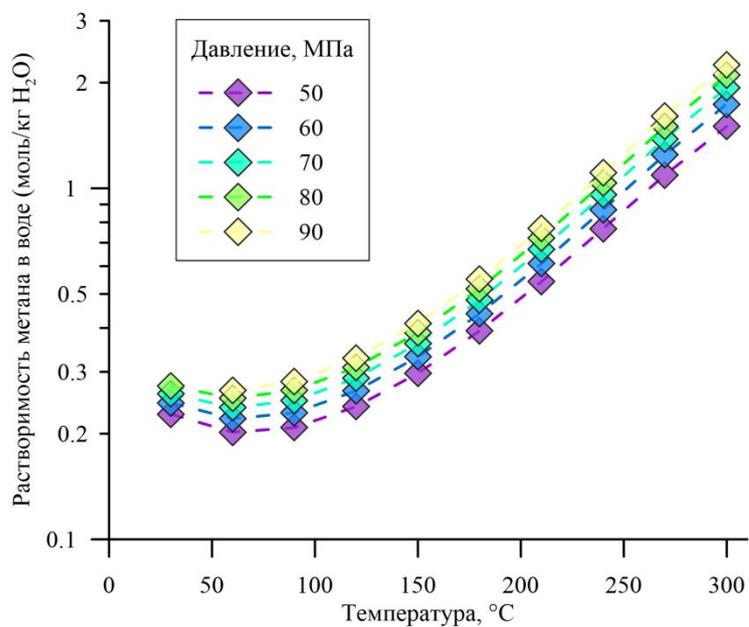


Рисунок 3.5 – Растворимость метана в воде при разных температурах и давлениях [Duan, Mao, 2006]

Миграционная способность углеводородных соединений определяется также соотношением размера их молекул (которые могут достигать 10 нм) с размерами пор (Рис. 3.6), который определяется степенью диагенетических преобразований в процессе эволюции осадочных отложений.

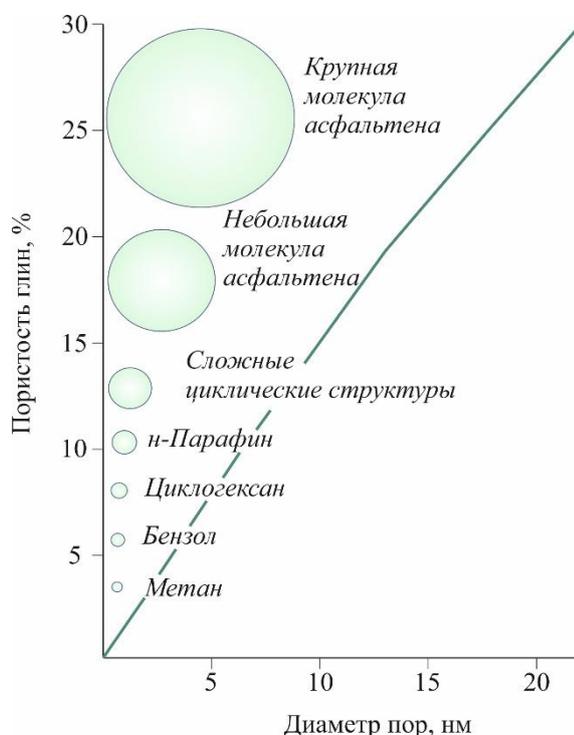


Рисунок 3.6 – Соотношение размера молекул углеводородных соединений с диаметром пор глинистых отложений [Жузе, 1986]

Одновременно с процессами миграции и растворения углеводородов, в подземных водах происходит их биохимическое разложение (биодegradация) [Newell et al., 1996] и сорбция.

Дegradация углеводородов при участии разных бактериальных сообществ происходит при вовлечении разных акцепторов электронов, в зависимости от их доступности и энергоэффективности, в первую очередь предпочтительным акцептором электронов является растворенный кислород, далее – ионы нитрата, четырехвалентного марганца, трехвалентного железа, сульфата, гидрокарбоната [Путилина и др., 2019; Zhang et al, 2019], схематическое представление реакций приведено на (Рис 3.4, 3.7). Можно отметить, что на этапе метаногенеза (Рис. 3.7), при преобразовании углеводородов происходит генерация метана, соответственно, наличие растворенного метана в воде может быть индикатором возможного притока жидких углеводородов [Zhang et al, 2019].

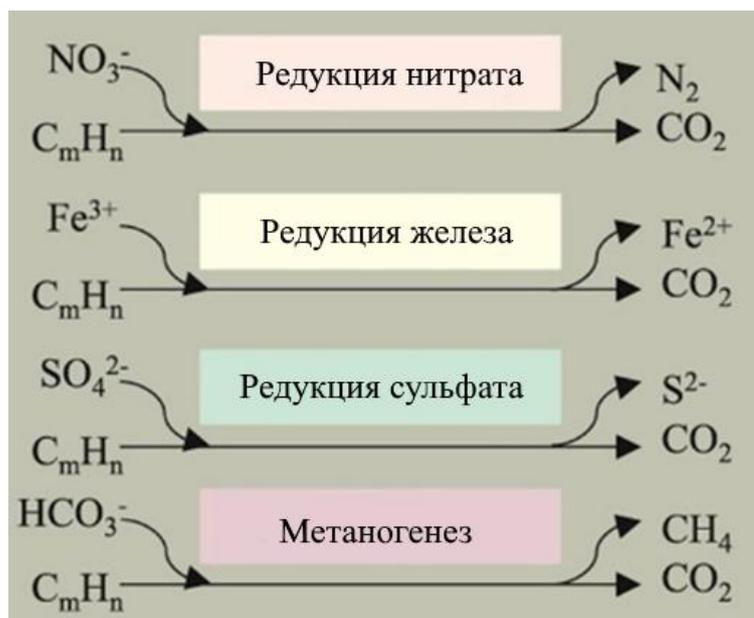


Рисунок 3.7 – Реакции преобразования углеводородов в процессе миграции в донных отложениях [Zhang et al, 2019]

Результаты исследований поровых вод донных отложений, отобранных в местах разгрузки углеводородных флюидов, в ходе экспедиции Class@Bikal-2018 [отчет экспедиции Class@Bikal-2018] показали подтверждение закономерностей трансформации состава поровых вод, описанных ранее и приведенных на (Рис. 3.4, 3.7). Пробоотбор осуществлялся с помощью стальной трубы [Рис. 3.8] с лепестковым кернорвателем в нижней части, внутри которой помещался пластиковый вкладыш с верхним клапаном. Для осуществления отбора донных осадков, труба с утяжелителями опускалась на дно с помощью металлического каната корабельной лебедки, после чего поднималась на борт судна, из нее извлекался вкладыш с образцом донных отложений и распиливался на секции для последующего изучения. Измерение нестабильных показателей (pH, Eh, температуры) производилось непосредственно после подъем пробоотборника с донными отложениями, после чего неизменные интервалы осадков герметично упаковывались для последующей транспортировки. Отбор проб поровых вод для последующего анализа состава осуществлялся методом центрифугирования, определения компонентов состава методами объемного титрования, спектрофотометрии и пламенной фотометрии, согласно методике, изложенной в работе [Казак и др., 2018].

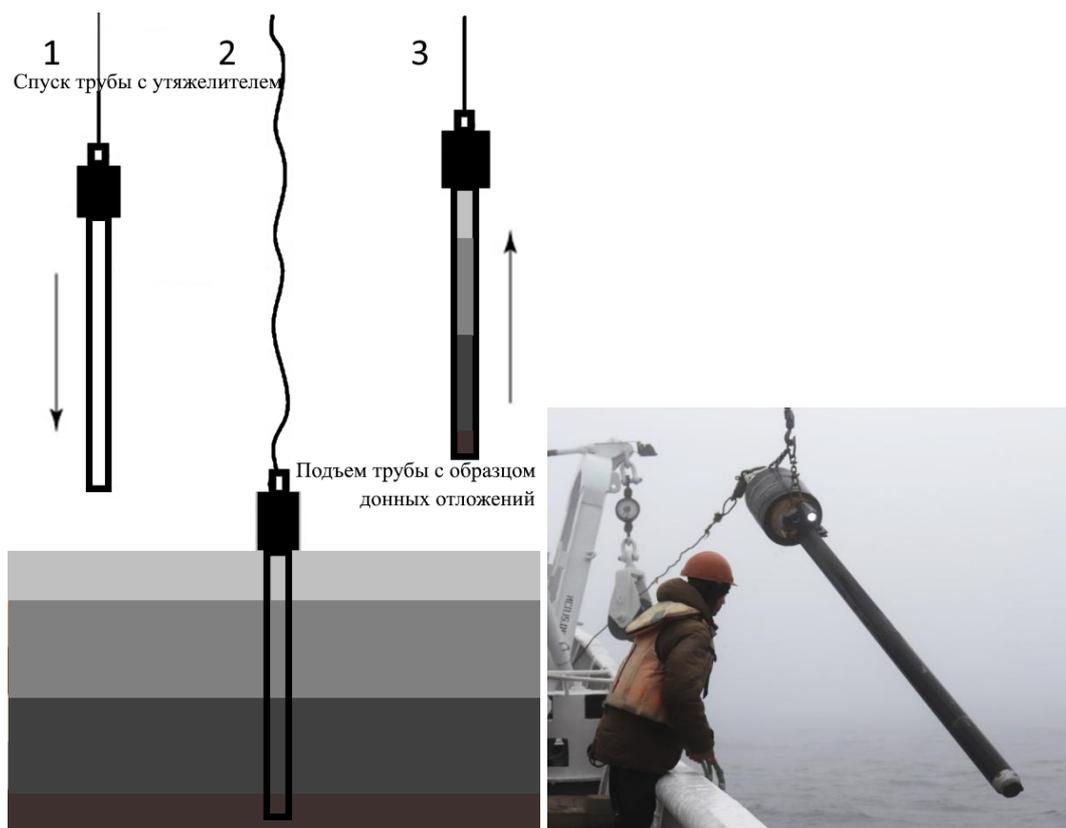


Рисунок 3.8 – Принципиальная схема и фото [отчет экспедиции Class@Bikal-2018] отбора донных отложений

Так, в более глубоких горизонтах донных отложений, где углеводороды находятся в стадии трансформации более длительный промежуток времени и, соответственно, количество выделившейся углекислоты больше [Zhang et al, 2019; Kuznetsov et al, 2023], – показатель кислотности среды заметно ниже, чем в вышележащих (придонных) более молодых отложениях (Рис. 3.9).

Распределение катионов также говорит о наличии процессов трансформации поровых вод донных отложений, согласно схеме (Рис 3.4), предложенной в работе [Kuznetsov et al, 2023]. Так, вверх по разрезу донных отложений, выявлено возрастание содержания ионов кальция, магния, стронция, калия (Рис. 3.10), за исключением самой верхней толщи донных отложений, подверженной опресняющему влиянию слабominерализованной воды озера и содержащей слаботрансформированные поровые воды.

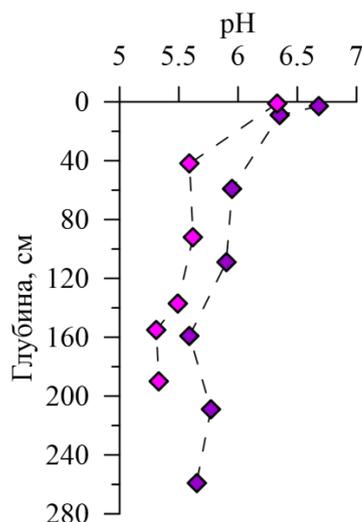


Рисунок 3.9 – Значения показателя pH поровых вод донных отложений озера Байкал в двух точках опробования в области разгрузки углеводородов [отчет экспедиции Class@Bikal-2018]

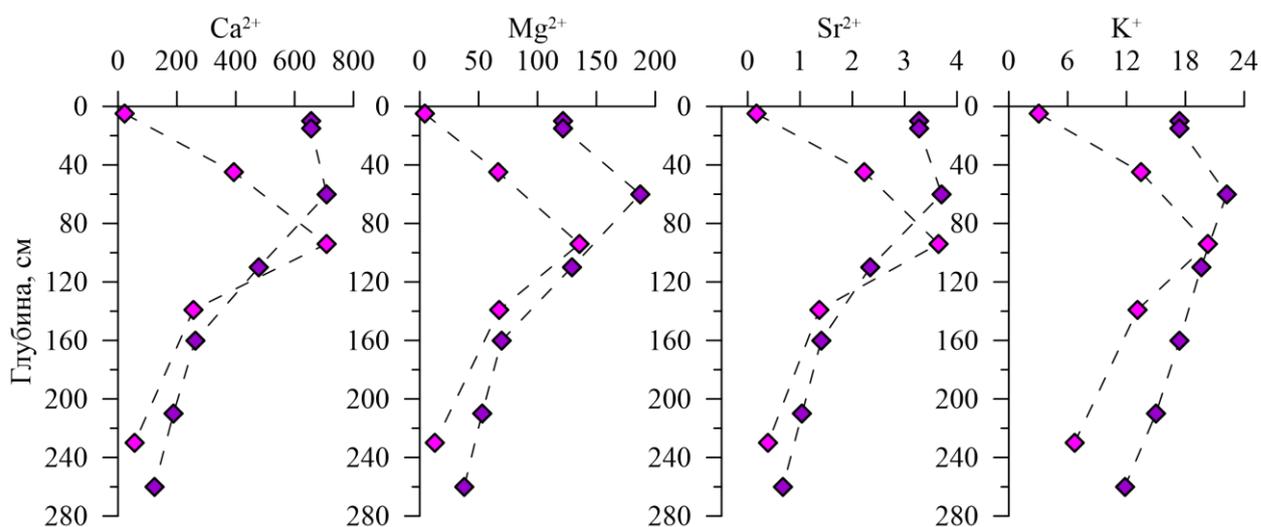


Рисунок 3.10 – Содержание катионов (мг/л) в поровых водах донных отложений озера Байкал в двух точках опробования в области разгрузки углеводородов [Сорокоумова, Казак, 2024]

В работе [Suarez, Rifai, 1999] дан обзор исследований по определению констант скоростей биоразложения первого порядка по данным мониторинга, проведенного на пяти объектах в США, расположенных от Флориды до Аляски. Оказалось, что характерные значения констант скоростей биоразложения находятся в диапазоне $\lambda = 0,001-0,010 \text{ сут}^{-1}$, периоды полуразложения составили 70-700 сут.

Сорбция определяется гранулометрическим и минеральным составом и содержанием органического вещества. Применительно к нефтепродуктам наблюдается линейная зависимость коэффициента равновесного сорбционного распределения

от содержания органического углерода в породе [Румынин, 2011; Appelo, Postma, 2005; Newell et al., 2002]. Таким образом, коэффициент равновесного распределения можно выразить как функцию от содержания органического углерода в породе и коэффициента распределения между органическим веществом породы и раствором:

$$K_d = K_{oc} \cdot f_{oc}$$

где f_{oc} – содержание органического углерода в породе, мг/мг; K_d – коэффициент равновесного сорбционного распределения порода-раствор, л/кг; K_{oc} – коэффициент сорбционного распределения между органическим веществом породы и раствором, л/кг, который часто оценивается на основе коэффициента распределения октанол-вода [Путилина и др., 2019] и растворимости воде.

Согласно литературным данным [Newell et al., 2002], когда содержание органического вещества в породе невелико – 0,0002-0,0200 (мг_{Сорг}/мг_{породы}), то сорбция на поверхности породы часто мала, даже при больших значениях коэффициента сорбционного распределения между органическим веществом породы и раствором. Значительное содержание органического вещества в породах приводит к сорбированию большего количества углеводородов, тем самым сокращается их вовлеченность в процессы биодegradации [Геннадиев и др., 2015].

Зафиксированная на Байкале разгрузка метана разных генетических типов (бактериальный, термогенный и abiогенный) свидетельствует о разных процессах его генерации [Видищева, 2023]. Абиогенный метан, обогащенный тяжелым изотопом углерода, зафиксирован в термальных источниках на побережье [Сутурин, 2023], бактериальный и термогенный метан зафиксирован на участках фокусированной разгрузки углеводородов [Видищева, 2021], также бактериальный метан широко распространен в верхней части разреза донных отложений озера, ввиду преобладания процессов бактериальной деструкции органического вещества. Площадная съемка [Пестунов и др., 2015], проведенная в 2013-2014 гг., показала, что парциальное давление метана в приводном слое атмосферы выше, чем на уровне 2 метров над водой, соответственно, вся поверхность озера представляет собой источник поступления метана в атмосферу.

При этом, важно отметить, что в процессе миграции метан окисляется как в аэробных, так и в анаэробных условиях. Максимальные скорости анаэробного окисления метана (до 40 мкмоль/(дм³ сут)) отмечены в восстановленных осадочных отложениях над слоем газогидратов в районе нефтепроявлений и Посольской банки [Пименов, 2015]. Скорость окисления метана в водной толще озера, по материалам [Гранин и др., 2013] в Южном и Среднем Байкале изменялась в диапазоне от 0,3 до $2,1 \times 10^{-2}$ нл/(л

сут), а в Северном – от 1,0 до 2.8×10^{-2} нл/(л сут). Согласно измерениям [Захаренко и др., 2015] скорость окисления метана в глубоководной зоне составила от 0,7 до $6,3 \times 10^{-2}$ нл/(л сут), при этом, более высокие скорости соответствовали аномально высоким концентрациям метана на участках фокусированной разгрузки углеводородов.

Суммарная разгрузка метана из донных осадков озера может быть оценена различными методами: балансовыми [Judd et al., 1997], гидроакустическими, оптическими, измерение потока газовыми ловушками, а также комплексированием этих и других методов. Для байкальской озерной котловины оценка разгрузки углеводородов, в целом, и метана, в частности, проводилась рядом исследователей [Конторович и др., 2007; Хлыстов и др., 2007, Макаров, 2016]. В работах Макарова М.М. [Макаров, 2016] приводятся результаты гидроакустических исследований по оценке расходов пузырьковых выходов газа (ПВГ) метана из донных отложений озера Байкал (Таблица 3.2), можно отметить, что оценённый поток метана для упомянутой ранее структуры Горевой Утёс составил 5,3-7 тонн в год. Расчеты потока растворенного газа на основе градиентного метода могут осуществляться за счет измерений концентраций в соседних по глубине горизонтах донных отложений (или придонного слоя воды) с помощью специальных придонных платформ, как, например описанная в работе [Здоровеннов и др., 2016].

Таблица 3.2 – Результаты расчета потока метана по данным акустических съемок пузырьковых выходов газа [Макаров, 2016]

Название ПВГ	Поток, т/г.	Количество съемок
Горевой утес	5,3-7,0	3
Кедровый-Листвянка	26,9-30,8	3
Маленький	15,0-29,0	3
Санкт-Петербург	74,2-92,1	4
Ворота	146,1-438,5	3

3.1. Расчет притока растворенного метана

Естественная разгрузка углеводородов в озере Байкал обусловлена его геологическим строением (Рис. 3.11) и особенностями осадконакопления. Байкальская озерная котловина сложного строения является центральным звеном Байкальской рифтовой зоны, соседствует с Верхне-Ангарской долиной на севере, Тункинской и более мелкими долинами и озером Хубсугул на западе-юго-западе, Танхойской – на юго-западе, Усть-Селенгинской – на юге, а также ответвляющейся от центральной части Байкала к северо-востоку Баргузинской долины [Ламакин, 1968; Беркин и др., 2009]. Байкальская котловина является ассиметричным рифтом, с более погруженной северо-западной частью (Рис. 3.11). В котловине озера выделяется три впадины: северная и центральная, разделенные поднятием Академического хребта, а также южная впадина, к юго-западной части которой относится изучаемая территория. Южная впадина построена на протерозой-раннепалеозойском фундаменте, разбитом многочисленными разломами и выполнена мощной толщей осадочных пород (до 9-14 км мощностью) [Логачев, 1999; Ширибон, 2008]. В границах котловины озера отмечается повышенный тепловой поток $6 \pm 2^\circ \text{C}$ на 100 м для Средней котловины и $7 \pm 2^\circ \text{C}$ на 100 м для Южной котловины [Гольмшток, 1997], в работе [Видищева, 2022] предполагается стационарность теплового поля в связи с тем, что активная фаза рифтогенеза началась еще в позднем олигоцене и продолжается в текущее время. Как отмечается в работе [Ломоносов, 1974] к осевой части байкальской рифтовой зоны приурочены метановые термы.

В строении центральной впадины выделяется крупная структура в виде уступа, протягивающаяся от мыса Ухан до острова Ольхон (Рис. 3.12) в юго-западном простирании (около 60 км), с высотой уступа до 100 метров, которая была описана по результатам исследований 2002 года в рамках проекта INTAS, а также в 2004 году Кузьминым М.И. [Кузьмин и др., 2001; De Batist et al., 2002; Кузьмин и др., 2004; Solovyeva et al., 2020] впоследствии была названа разлом Гидратный, т.к. она является «проводящей» и к ней приурочены зоны фокусированной разгрузки углеводородов, в том числе – участки структур наличия газовых гидратов – МГУ, Новосибирск, Ухан [Ахманов и др., 2018; Solovyeva et al., 2020; Видищева и др., 2021].

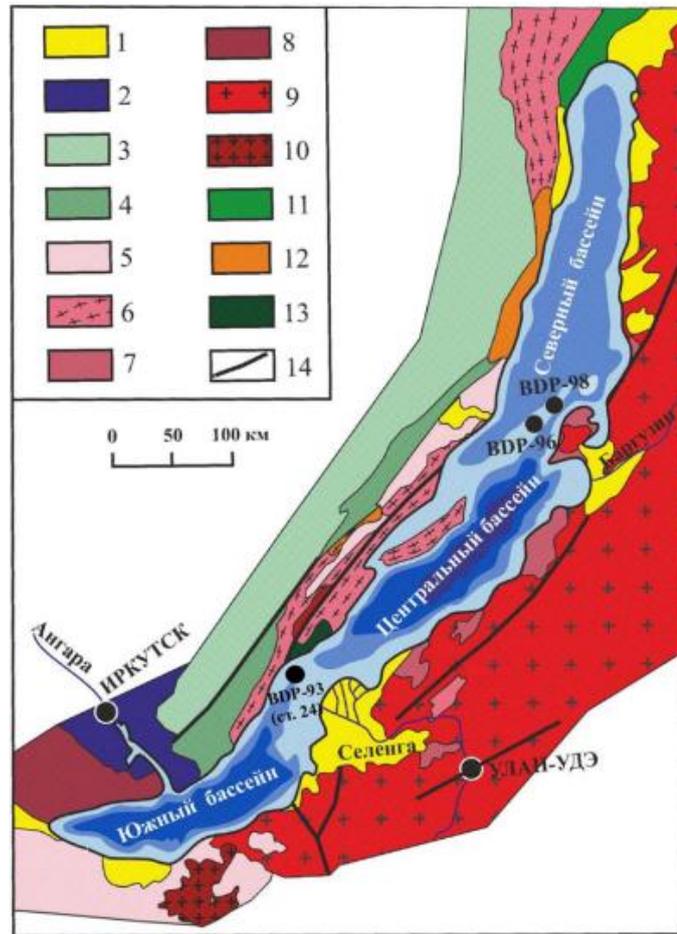


Рисунок 3.11 – Схематическая геологическая карта побережья озера Байкал [Гвоздков, 1999]. Условные обозначения: 1 – кайнозойские отложения: пески, глины, галечники, глины; 2 – юрские отложения: песчаники, конгломераты, алевролиты, аргиллиты; 3 – венд-кембрийские песчаники, гравелиты, алевролиты, известняки; 4 – рифейские песчаники, доломиты, известняки, сланцы; 5 – нижнепротерозойский метаморфический комплекс; 6 – архей-протерозойские мигматиты и кристаллические сланцы, плагиогнейсы, метаультрабазиты, кварциты, мраморы; 7 – архейские гнейсы, кристаллические сланцы, мигматиты, мраморы, кварциты, амфиболиты; 8 – архейские кристаллические сланцы, гнейсы, мраморы, мигматиты; 9 – палеозойские гранитоиды; 10 – рифейские гранитоиды; 11 – нижнепротерозойские амфиболиты и габбро; 12 – нижнепротерозойские базальтовые порфириды, лавы, риодациты, кварцевые порфиры, туфы; 13 – нижнепротерозойские габбро, габбро-диориты, габбро-пироксениты; 14 – зоны глубинных разломов. Черными кружками отмечены места бурения глубоководных скважин.

В работе [Solovyeva et al., 2020] отмечается, что зона разлома сопряжена с большим количеством субпараллельных тектонических нарушений, которые, согласно данным сейсмических исследований, подразделяются на ряд участков с различной мощностью осадков, перекрывающих сами разломы, однако, к зоне, выходящей к поверхности дна (т.е. слой донных отложений сверху 0-10 метров), относится большая часть главной структуры ~50 км, а также значительная часть меньших тектонических нарушений. Большое количество фокусированных выходов углеводородов, скорее всего, свидетельствует об их

преимущественном питании из глубинных резервуаров [Clarke, Cleverly; 1991], с миграцией к поверхности дна через дислоцированные зоны. Глубинное происхождение газов подтверждается изотопными исследованиями [Видищева и др., 2021, Видищева, 2023]. В работе [Голубев 2007] приводятся схемы формирования тепловых аномалий в Северной котловине Байкала, обусловленные восходящим движением подземных вод по высокопроницаемым зонам, при этом, автором отмечается возможность аналогичных выходов и в средней котловине, однако, ввиду ее большей глубоководности и предполагаемой невысокой минерализацией разгружающихся вод, их идентификация осложнена, несмотря на достаточно высокую термическую изученность.

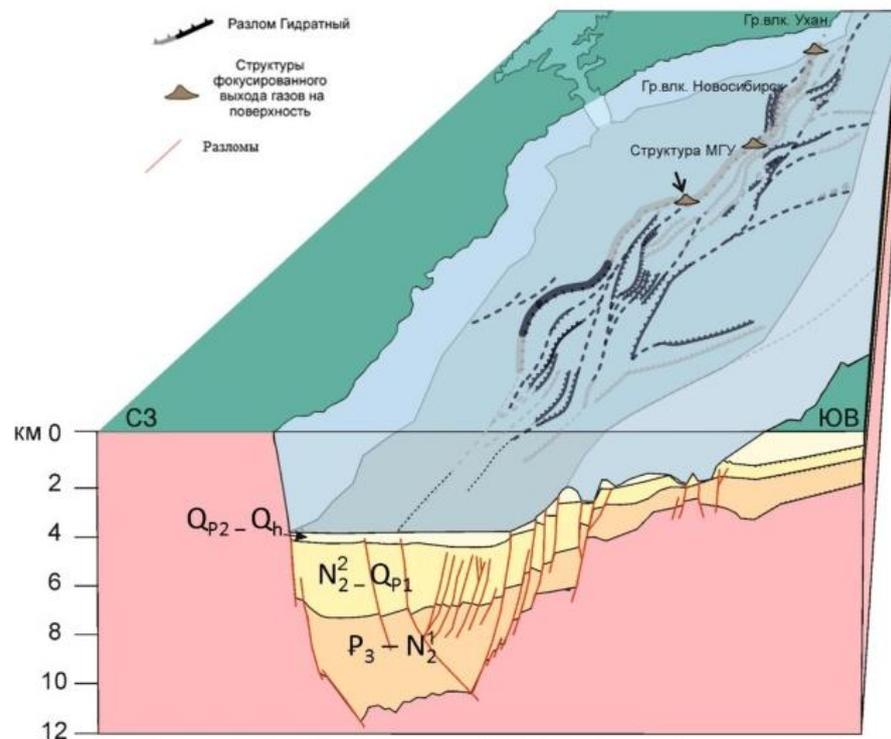


Рисунок 3.12 – Схематический разрез центральной котловины озера Байкал по данным [Видищева и др., 2021]

Оценка количества газа, разгружающегося по разлому Гидратный, представляет большой интерес, ввиду значительности этой структуры в региональном масштабе всего озера, соответственно расчет расхода притока углеводородов, в целом, и метана, в частности, позволит оценить важнейшую природную балансовую часть общего притока углеводородов.

На (Рис. 3.13) показана классификация сегментов разлома Гидратный исходя из мощности перекрывающих отложений, принятая в работе [Solovyeva et al., 2020].

Авторами, на основании обработки сейсмоакустических данных, выделяется три типа сегментов разлома: первый – с мощностью перекрывающих отложений 0-10 метров, второй – с мощностью перекрывающих отложений 10-40 метров, и третий – с мощностью перекрывающих отложений 40-85 метров. На протяжении всего разлома выделяется, в основном, первый тип разреза, по которому осуществляется концентрированная разгрузка флюидов в озеро и лишь около четверти длины разлома относится ко второму и третьему типу. Можно отметить, что, практически по всей длине, разлом равноудален от берега (не считая небольшого отрезка на севере, где он соединяется с вдольбереговым разломом), соответственно, согласно представлениям о строении котловины озера (Рис. 3.12), разлом пререзает однородный по мощности слой осадочных отложений. Также, несмотря на разную степень экспозиции дислоцированной зоны относительно поверхности дна, стоит подчеркнуть единство ее тектонического генезиса, и, соответственно, можно предположить схожий механизм источников поступления растворенного метана.

В качестве иллюстрации участка выхода разлома на поверхность дна можно рассматривать сейсмоакустические профили, приведенные в работах [Solovyeva et al., 2020, Видищева и др., 2021]. Профиль 1 (Рис. 3.14), приведенный в работе [Видищева и др., 2021], находится на самом южном сегменте разлома Гидратный и относится к первому типу сегментов, характеризующимся минимальным количеством перекрывающих осадков, согласно классификации, принятой в работе [Solovyeva et al., 2020], также на этом профиле отсутствуют грязевые вулканы или структуры с фокусированными выходами углеводородов, которые, в пределах всей разломной зоны хоть и часто встречаются (структуры МГУ, Санкт-Петербург, Новосибирск, Ухан), однако имеют точечное распространение в пределах региональной шестидесятикилометровой дислоцированной зоны. В центральной части профиля, в области выхода разлома Гидратный на поверхность дна, расположена станция отбора проб донных осадков BL19-387G (Рис. 3.14). Пробоотбор производился с применением гравитационной трубы (Рис. 3.8), после извлечения трубы, керн извлекался из вкладыша, отбирались пробы осадков, после чего они дегазировались и отбирались пробы газов для последующего определения их состава и концентрации. В ходе интерпретации полученных результатов авторами [Видищева и др., 2021] были сформулированы схемы разгрузки газов в пределах разлома Гидратный, при этом модель 1 (Рис. 3.15), соответствует первому типу сегментов [Solovyeva et al., 2020], которые преимущественно распространены на исследуемом объекте. Можно отметить, что по разлому происходит преимущественная фильтрация флюида с диффузией во вмещающие породы.

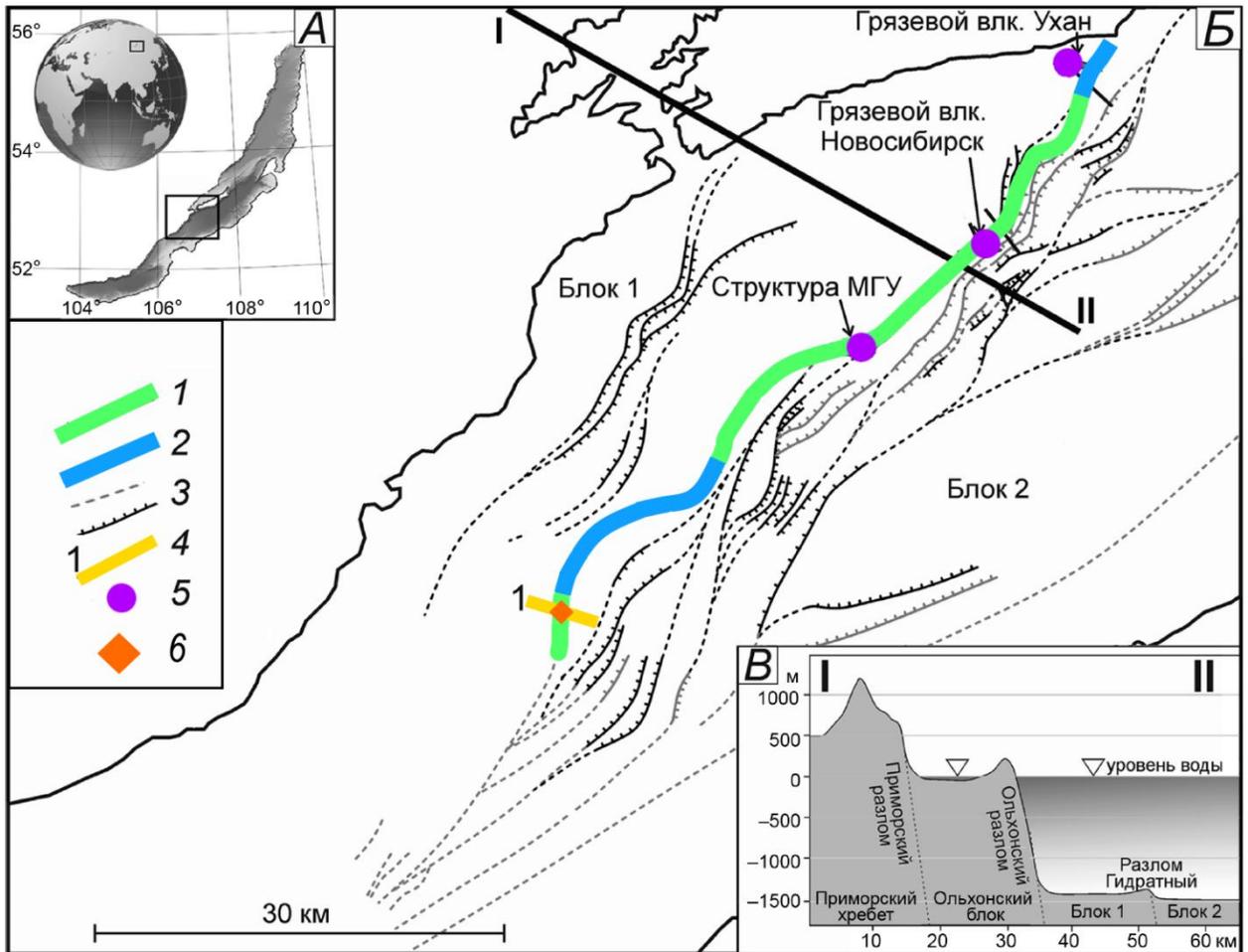


Рисунок 3.13 – Классификация сегментов разлома Гидратный исходя из мощности перекрывающих отложений, принятая в работе [Solovyeva et al., 2020] с дополнениями, согласно работе [Видищева и др., 2021]. А — Расположение района исследований; Б — Карта разломов средней котловины озера; В — Схематический поперечный разрез через центральную котловину оз. Байкал [Sebayev et al., 2003;]. 1 — разлом Гидратный, сегменты 1 типа (мощность перекрывающих отложений <10 м); 2 — разлом Гидратный, сегменты 2 и 3 типа (мощность перекрывающих отложений 10-85 м); 3 — другие разломы; 4 — положение и номер профиля донного опробования; 5 — структуры с фокусированным выходом флюидов на поверхность; 6 — положение станции донного опробования BL19-387G.

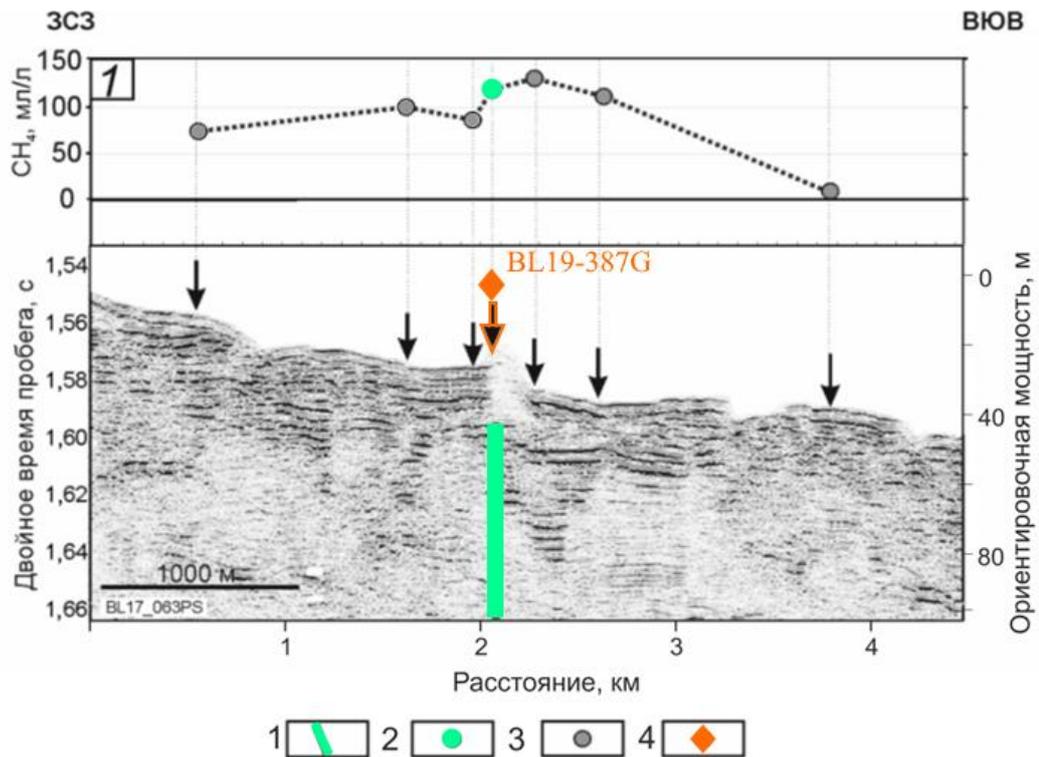


Рисунок 3.14 – Профиль №1 максимальных концентраций метана в донных отложениях на южном сегменте (см. рис. 3.13) разлома Гидратный [Видищева и др., 2021], с изменениями. 1 – разлом Гидратный; 2 – концентрация метана в донных отложениях на станции отбора проб донных осадков BL19-387G; 3 – концентрация метана в донных отложениях на станциях профиля №1; 4 – положение станции отбора проб донных осадков BL19-387G.

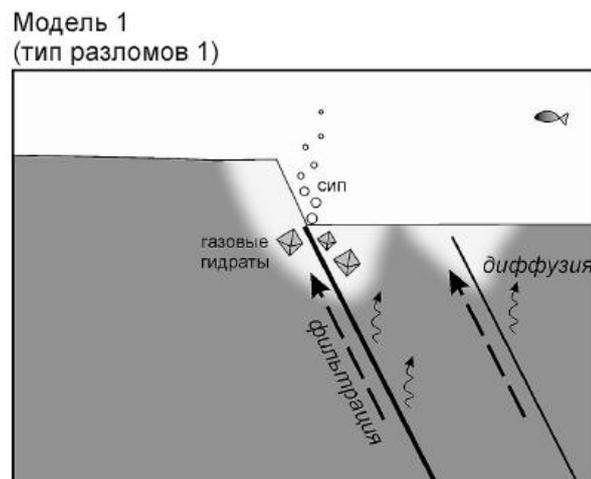


Рисунок 3.15 – Схематическое представление миграции газов в верхних частях разреза в пределах зоны разлома Гидратный [Видищева и др., 2021]

3.1.1. Геомиграционная модель разломной зоны

Для оценки потенциальной природной разгрузки углеводородов, представленных метаном, растворенным в подземных водах, по разлому Гидратный были проведены модельные расчеты согласно постановке в виде модели конвективно-диффузионного переноса по разломной зоне, заполненной проницаемым материалом, с учётом диффузии во вмещающие породы. Основанием для такой схематизации являются результаты интерпретации сейсмоакустических исследований [Solovyeva et al., 2020; Пятилова и др., 2022], на которых разлом представляется как разуплотненная зона с отсутствующей слоистостью, контрастно выделяющаяся своей «прозрачностью» на сейсмоакустических профилях и данные исследований, представленные в работе [Видищева и др., 2021], в которой предложено описание схемы миграции газов в пределах разлома Гидратный. Также, согласно работе [Вилор, 2015], в крупных разломах (до глубин 5-10 км), к которым, несомненно, относится и разлом Гидратный, формируются устойчивые, в масштабах геологического времени, градиенты термодинамических параметров.

Основной источник термогенного метана, согласно работе [Жузе, 1986] (Рис. 3.1) должен располагаться глубже «главной зоны нефтеобразования». В работе [Видищева, 2023] выделено «нефтяное окно» до глубин 5500 м от поверхности дна, соответственно, главная зона газообразования находится ниже этой глубины, где можно предположить наличие конвективных ячеек, аналогичных рассмотренным в работе [Лямина и др., 2022], которые, и обуславливают поток флюидов по разлому. В рамках принятой модели, концентрация вещества, поступающего из источника, предполагается постоянной.

Ширина разуплотненной зоны, соответствующей каналу преимущественной миграции флюидов, неравномерна на протяжении всего разлома, и, согласно результатам интерпретации сейсмоакустических данных, наибольшие значения (более 1000 м в придонной части) соответствуют зонам фокусированной разгрузки (грязевые вулканы Новосибирск, Санкт-Петербург) а меньшие (около 100 м) – составляют большую часть длины разлома [Solovyeva et al., 2020; Видищева и др., 2021; Видищева, 2023; Пятилова и др., 2022], при этом, важно отметить, что, в рамках принимаемой концептуальной модели, ширина разлома меньше его предполагаемой глубины. Характеристики некоторых структур фокусированной разгрузки углеводородов на дне озера Байкал, представленные в работе [Пятилова и др., 2022], приведены в Таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Характеристики проводящих структур дна озера Байкал [Пятилова и др., 2022]

Название структуры	Ширина подводящего канала у поверхности, м
Большой	900
Маленький	400
Малютка	700
Новосибирск	1000
Таланка	900
К-2	300
К-6	500
Санкт-Петербург	1135
МГУ	1150
Академический хребет	~700

Температура в рассматриваемой области меняется в широком диапазоне – от 3 °С в придонной части озера [Голубев, 1982], до 200-300 °С на глубинах свыше 5000 метров, согласно расчетам изменения температуры с глубиной при линейном градиенте с учетом повышенного теплового потока [Гольмшток и др., 1997; Видищева, 2023].

Сведения о значительном потоке вод, разгружающихся по разлому, отсутствуют, по-видимому, скорости фильтрации флюидов по нему невысокие (но, в то же время, превышают скорости фильтрации во вмещающих породах), поэтому важно учитывать и вклад дисперсии и диффузионного переноса по разлому. Скорости фильтрации, в рамках принимаемой модели, предполагаются постоянными во времени, при расчетах будет исследован диапазон предполагаемых скоростей фильтрации, который выбран исходя из представления о преимущественно алевро-глинистом составе отложений [Видищева и др., 2021], с проводящими каналами, зафиксированными при отборе кернов донных отложений, что, в целом, похоже на проницаемые глинистые отложения речных долин, для которых, согласно [Шестаков, 1995], характерны следующие значения коэффициентов фильтрации 0,0005-0,01 м/сут. В работе [Голубев, 2007], для интенсивной разгрузки термальных вод в Северной котловине озера Байкал в бухте Фролиха расчетная скорость составляет 0,09 м/сут. Также, в работе [Naascke et al., 2008], для донных отложений шельфа (в ненарушенных условиях), представленных илами с прослоями терригенного материала, предполагается коэффициент фильтрации 0,0000027 м/сут, для отложений Байкала вне разломных зон,

скорости фильтрации в донных отложениях, по-видимому, должны быть близки или ниже (наличие более проницаемых терригенных прослоев в прилегающих к разлому блоках не выявлено, соответственно в зоне разлома коэффициент фильтрации будет выше, ввиду его проводящей природы, отмечаемой по данным опробования и геофизическим исследованиям. Соответственно, будет исследован диапазон предполагаемых скоростей фильтрации 0,0001-0,01 м/сут.

В миграции растворенного метана по разлому значительна роль процессов диффузии, которые, в общем случае, обусловлены градиентом химического потенциала [Лехов, 2010; Лехов и др., 2017], но в рамках концептуальной модели, принимаемой в исследуемой задаче, рассматривается диффузия, возникающая за счет градиента концентраций, ввиду наличия постояннодействующего источника поступления растворенного метана. Данные о коэффициенте диффузии, характеризующем зону разлома, отсутствуют, соответственно, произведены расчеты для диапазона значений ($9,68 \times 10^{-5}$ - $2,7 \times 10^{-3}$ м²/сут) [Oelkers, 1991; Chen et al., 2018], соответствующем диапазону значений коэффициентов диффузии метана в воде при предполагаемых температурах в зоне разлома (3-300 °С). Диффузия в окружающие породы схематизирована как процесс, происходящий перпендикулярно миграции растворенного вещества по разлому, в среду неограниченной ёмкости, из-за значительной мощности отложений (более 5 км), а также простиранием этих отложений в обе стороны от разлома на несколько десятков километров.

Расчетный период для оценки миграции растворенного метана по разлому принимался согласно предпосылке о начале этапа термогенной газогенерации [Видищева, 2023] при преобразовании органического вещества донных осадков при достижении достаточной мощности отложений – 23 млн. лет.

Максимальная растворимость метана, меняющаяся по глубине разлома, в связи с изменением температуры, представляет верхний предел возможного содержания при расчете изменения концентрации растворенного метана (Глава 3, Рис. 3.5). Этот же параметр определяет максимально возможную (2,5 моль/1 кг Н₂О [Duan, Mao, 2006]) концентрацию в источнике, расположенном в зоне заложения разлома – на глубине более 5,5 км и с температурой более 300°С.

Вклад процесса бактериальной генерации метана в данной модели не учитывается, так как, по данным [Видищева и др., 2021; Видищева, 2023], в зоне разлома метан преимущественно термогенного происхождения. Вклад процесса окисления метана также не учитывался, ввиду предполагаемой небольшой его балансовой доли по всей глубине

разлома, т.к. его значимость должна быть существенной лишь в придонной части разлома, которая составляет небольшую часть от всей 5,5-километровой глубины.

Схематическое изображение концептуальной модели с перечислением исходных параметров для решаемой задачи приведено на (Рис. 3.16).

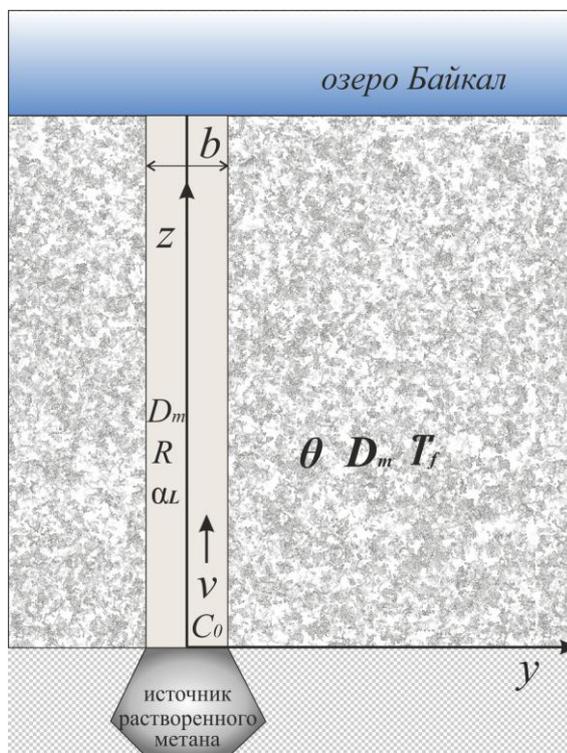


Рисунок 3.16 – Концептуальная модель миграции растворенного метана в разломной зоне [Сорокоумова, Расторгуев, 2025]

Массоперенос в зоне разлома представляет собой перемещение растворенных компонентов с потоком подземных вод, которое происходит совместно с процессом рассеивания за счет процессов гидродинамической дисперсии и диффузии. Некоторые вещества в процессе миграции подвержены распаду (разложению), а также сорбции на твердых частицах за счет физико-химического взаимодействия. Геометрические параметры разлома (соотношение его ширины и глубины), а также его расположение в весьма слабопроницаемых отложениях, позволяют представить процесс миграции растворенных компонентов по нему аналогичным таковому в трещине. Единая модель, учитывающая вышеперечисленные процессы, представлена дифференциальным уравнением баланса массы в трещине [Tang et al, 1981]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} - \frac{v}{n} \frac{\partial c}{\partial z} - \frac{D}{n} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + \lambda c + \frac{q}{bn} = 0 \quad (3.1)$$

$$D = \alpha_L v + D_m, 0 \leq z \leq \infty$$

где z – расстояние вдоль продольной оси трещины, м; t – время, сут; c – концентрация растворенного вещества $c(z, t)$ в трещине, кг/м³; v – скорость фильтрации в трещине, м/сут; λ – константа разложения, сут⁻¹; $\lambda = \ln 2 / t_{0,5}$; $t_{0,5}$ – период полураспада, м; q – расход диффузионного потока, кг/м²сут; n – эффективная пористость в зоне разлома; D – коэффициент гидродисперсии в зоне разлома, м²/сут; D_m – коэффициент молекулярной диффузии в воде, м²/сут; b – ширина зоны разлома, м; α_L – продольная дисперсивность, м.

Важно отметить, что для решения задач, связанных с распространением загрязнения, существенное значение имеет процесс дисперсии, ввиду ее особенной роли в формировании ореолов распространения мигрантов в подземных водах [Bear, 1972; Appelo, Postma, 2005; Лехов, 2010; Румынин, 2011].

Дифференциальное уравнение для вмещающих пород (поровой матрицы) для полосы единичной мощности в направлении перпендикулярном простиранию трещины (разломной зоны) [Tang et al, 1981]:

$$\frac{\partial c'}{\partial t} - \frac{D'}{n'} \frac{\partial^2 c'}{\partial y^2} + \lambda c' = 0 \quad (3.2)$$

$$D' = \tau D_m$$

$$b \leq y \leq \infty$$

где y – расстояние перпендикулярное оси трещины (разломной зоны), м; t – время, сут; c' – концентрация растворенного вещества $c(y, z, t)$ в порах вмещающих пород, кг/м³; D' – коэффициент диффузии во вмещающих породах, м²/сут; τ – коэффициент извилистости поровых каналов вмещающих пород; n' – коэффициент замедления во вмещающих породах.

Принятые допущения для описания массопереноса по трещине: ширина трещины намного меньше ее длины; внутри трещины в поперечном разрезе концентрация одинакова; скорость массопереноса существенно выше в трещине, чем во вмещающих породах; проницаемость вмещающих пород настолько низкая, что перенос вещества в них обусловлен преимущественно диффузионным переносом. Перечисленные условия приводят модель к одномерному переносу вдоль трещины и перпендикулярному ему одномерному переносу во вмещающие породы, с учетом представлений о массопереносе в разломе, данные допущения актуальны и для описания процесса миграции по нему.

В случае переноса вещества по трещине (разлому) концентрация растворенного компонента в трещине, согласно модели конвективно-дисперсионного переноса, с учетом принятых допущений, может быть получена на основании следующего аналитического решения [Tang et al, 1981]:

$$c = c_0 \frac{\exp(vz)}{\pi^{0.5}} \int_l^\infty \exp\left[-\xi^2 - \frac{v^2 z^2}{4\xi^2}\right] \exp(-\eta z^2) \left\{ \exp[-\lambda^{0.5} Y] \operatorname{erfc}\left[\frac{Y}{2T} - \lambda^{0.5} T\right] + \exp[\lambda^{0.5} Y] \operatorname{erfc}\left[\frac{Y}{2T} + \lambda^{0.5} T\right] \right\} d\xi, \quad (3.3)$$

$$\text{где } l = \frac{z}{2} \left(\frac{n}{Dt}\right)^{0.5}, \quad v = \frac{u}{2D},$$

$$\beta^2 = \frac{4nD}{u^2}, \quad Y = \frac{v^2 \beta^2 z^2}{4A\xi^2},$$

$$A = \frac{bn}{\theta(n'D')^{0.5}}, \quad \eta = \frac{\lambda n}{4D\xi^2},$$

$$\xi \geq \frac{z}{2} \left(\frac{n}{Dt}\right)^{0.5}, \quad t \geq \frac{nz^2}{4D\xi^2}$$

В уравнении (3.3) c_0 – концентрация растворенного вещества в источнике в начале разломной зоны (на выходе из источника).

Реализация аналитического расчета выполнялась при помощи специально разработанной программы на языке Python версии 3.10 на базе Google Compute Engine при использовании хостингового сервиса Jupyter Notebook – Google Colab [<https://colab.research.google.com/?hl=ru>]. Оценка корректности работы разработанного программного кода производилась путем воспроизведения результатов из примеров расчётов, приведенных в работе [Tang et al, 1981], параметризация расчётных задач приведена в Табл. 3.4, результаты сопоставления приведены в графическом виде на Рис. 3.17. Можно отметить, что разработанный код достаточно корректно воспроизводит тестовый пример из работы [Tang et al, 1981] с представленным аналитическим решением, что позволяет использовать его для решения поставленной задачи моделирования миграции растворенного метана в разломной зоне.

Таблица 3.4 – Параметры расчетов для проверки работы расчётного кода [Tang et al, 1981]

	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Время расчета, сут	100	1000	10000
Скорость фильтрации, м/сут	0,01	0,01	0,01
Ширина трещины, м	0,00005	0,00005	0,00005
Дисперсивность в трещине, м ² /сут	0,5	0,5	0,5
Пористость, безразм	0,01	0,01	0,01
Извилистость	0,1	0,1	0,1
Коэфф. молекулярной диффузии в воде, м ² /сут	0,013824	0,013824	0,013824
Начальная концентрация	1	1	1
Период полураспада вещества, сут	4508	4508	4508
Фактор замедления в трещине	1	1	1
Фактор замедления в пористой матрице	1	1	1

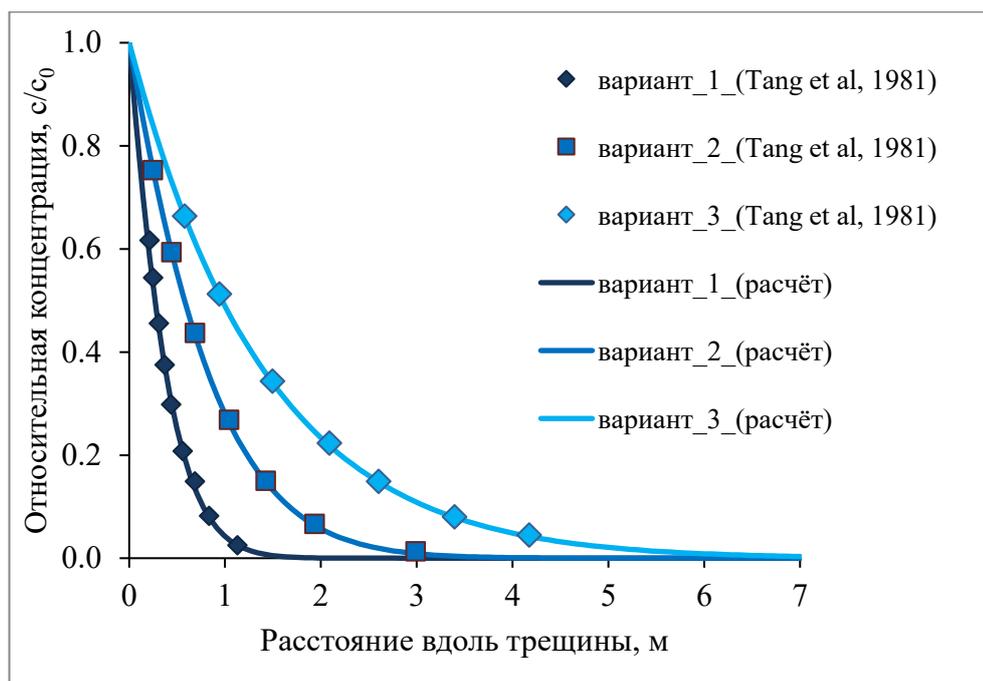


Рисунок 3.17 – Сопоставление результатов расчёта с применением разработанного программного кода и данных расчёта, приведенных в работе [Tang et al, 1981]

Аналитические расчеты для исследования миграции растворенного метана производились для набора параметров для оценки вклада их изменения в итоговый результат, диапазон исследованных параметров представлен в Табл. 3.5.

Диапазон варьирования коэффициента молекулярной диффузии растворенного метана в воде соответствовал его значениям в интервале температур 10-300°C [Oelkers, 1991]. Ширина разломной зоны принята постоянной – 300 м, что соответствует диапазону значений (100-700 м), зафиксированных на сейсмоакустических профилях, пересекающих разлом вне зон фокусированной разгрузки углеводородов. Эффективная пористость в разломной зоне принята 0,01. Коэффициент замедления для вмещающих пород принят равным 1, т.е. процесс сорбции не учитывается, ввиду предположения о заполненности сорбционных центров в ходе длительного процесса миграции растворенного вещества по разлому. Диапазон значений для параметра продольной дисперсивности составил 50-200 м, что согласуется с данными обобщения материалов мониторинга загрязнения и результатов опытно-миграционных работ, приведенными в работе [Лехов, 2010], где для пути миграции от 1 км до 10 км значения продольной дисперсивности, в основном, лежат в диапазоне 50-300 м. При определении ориентировочного значения параметра продольной дисперсивности для пути миграции длиной 5500 м, согласно эмпирической зависимости [Schulze-Makuch, 2005], основанной на коэффициентах, приведенных для экспериментальных данных разных категорий надежности для неконсолидированных осадочных пород (представленных разнозернистыми песками, гравием, глиной, пылеватыми отложениями) получен диапазон 9-207 м.

Таблица 3.5 – Диапазоны варьируемых параметров

Параметр, единицы измерения	Минимальное значение	Максимальное значение
Коэффициент молекулярной диффузии растворенного метана в воде, м ² /сут	$9,68 \times 10^{-5}$	$2,7 \times 10^{-3}$
Продольная дисперсивность, м	50	200
Скорость фильтрации, м/сут	0,0001	0,01

3.1.2. Моделирование массопереноса растворенного метана

Разработанный код позволил выполнить многовариантные расчеты согласно выражению (3.3), для оценки адекватности которых производилось сравнение результатов расчетов концентраций растворенного метана в разломной зоне со значениями максимальной растворимости метана при разных значениях температуры, которая представляет верхнюю границу возможного диапазона концентраций растворенного метана.

Вариантные расчеты для набора параметров продольной дисперсивности и скорости фильтрации представлены на Рис. 3.18. По результатам расчетов, была принята скорость фильтрации в разломной зоне – 0,001 м/сут.

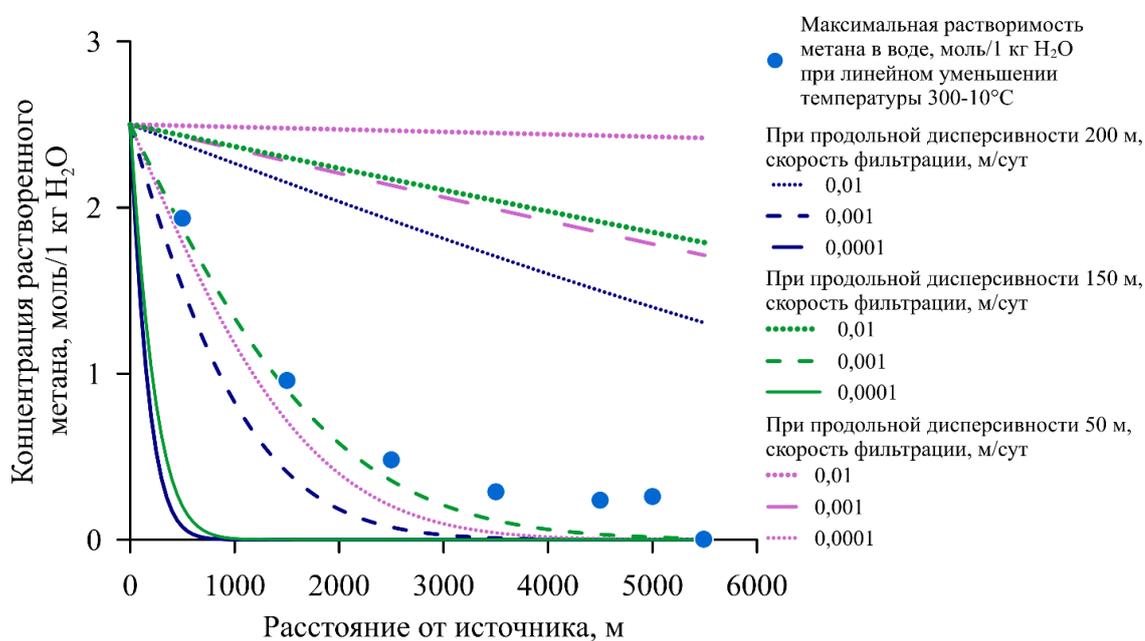


Рисунок 3.18 – Распределение концентрации растворенного метана в разломе при концентрации в источнике 2,5 моль/1 кг H₂O, $D_m = 2,7 \times 10^{-3}$ м²/сут, $\tau = 0,1$, при различных значениях скорости фильтрации и продольной дисперсивности

Ввиду наиболее значительного вклада процессов диффузии и дисперсии в перенос растворенного метана в рамках рассматриваемой задачи, приведены результаты расчетов для диапазонов этих параметров (Рис. 3.19-3.20). Результаты расчетов показали заметную чувствительность распределения растворенного метана в разломе от коэффициента молекулярной диффузии растворенного метана в воде (Рис. 3.19), изменение параметра на два порядка приводит к максимальному различию концентраций на удалении от источника. Однако влияние параметра продольной дисперсивности на распределение концентрации растворенного метана в разломе наиболее существенно (Рис. 3.20).

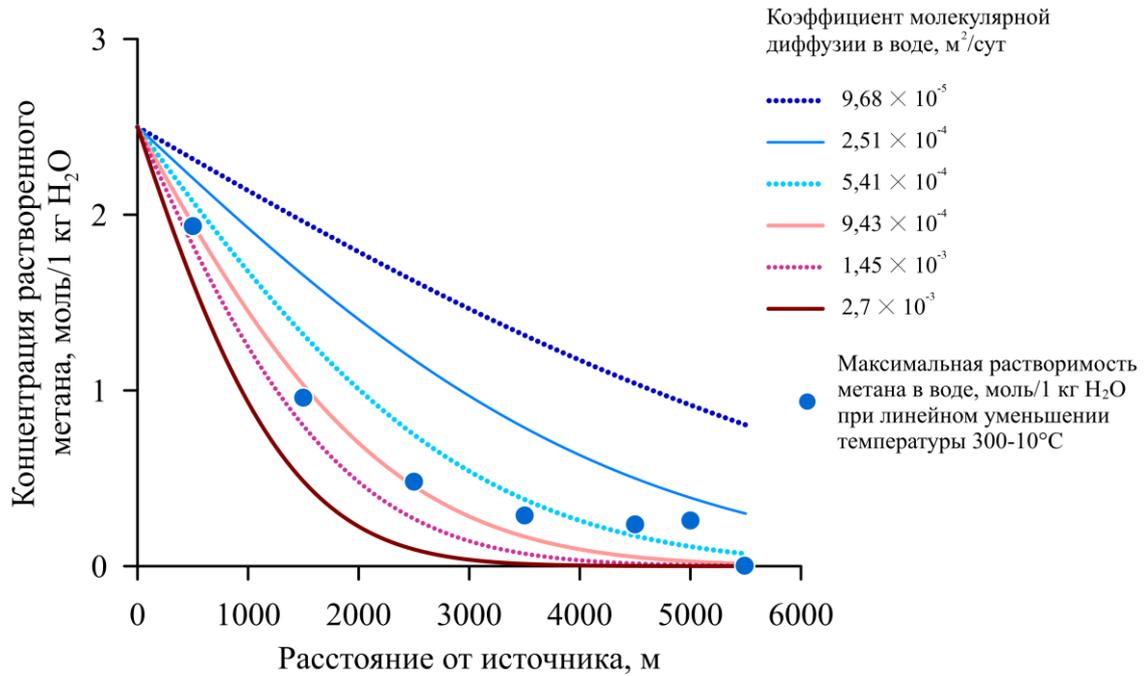


Рисунок 3.19 – Распределение концентрации растворенного метана в разломе при концентрации в источнике 2,5 моль/1 кг H₂O, $\alpha_L = 100$ м, $\tau = 0,1$, при различных значениях коэффициента молекулярной диффузии растворенного метана в воде

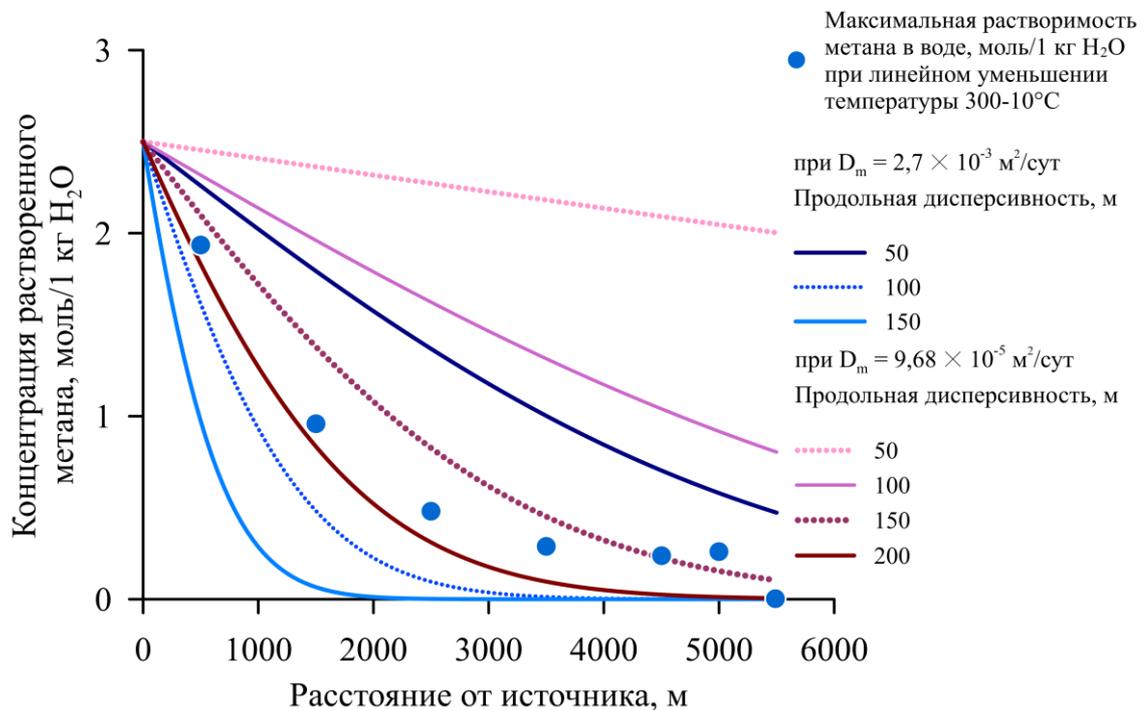


Рисунок 3.20 – Распределение концентрации растворенного метана в разломе при концентрации в источнике 2,5 моль/1 кг H₂O, $\tau = 0,1$, при различных значениях продольной дисперсивности при максимальном и минимальном значениях коэффициента молекулярной диффузии растворенного метана в воде

На Рис. 3.21 приведены результаты расчетов для комбинации параметра продольной дисперсивности и коэффициента молекулярной диффузии растворенного метана в воде, соответствующие профилю концентрации растворенного метана в разломе близкому к максимальной растворимости метана.

Также было произведено сопоставление (Табл. 3.6) полученных результатов расчетов с данными опробования верхней части донных отложений, приведенными в работе [Видищева и др., 2021] для станции пробоотбора VL19-387G (Рис. 3.13-3.14), расположенной на участке, где разлом Гидратный перекрыт отложениями небольшой мощности. Значения концентрации метана в донных отложениях, приведенные в статье, были пересчитаны на содержание в поровом пространстве донных отложений, согласно данным о пористости осадков верхней части разреза, приведенным в материале статьи [Гольмшток и др., 1997]. Можно отметить, что расчетные данные, в целом, весьма близки к измеренным значениям концентраций.

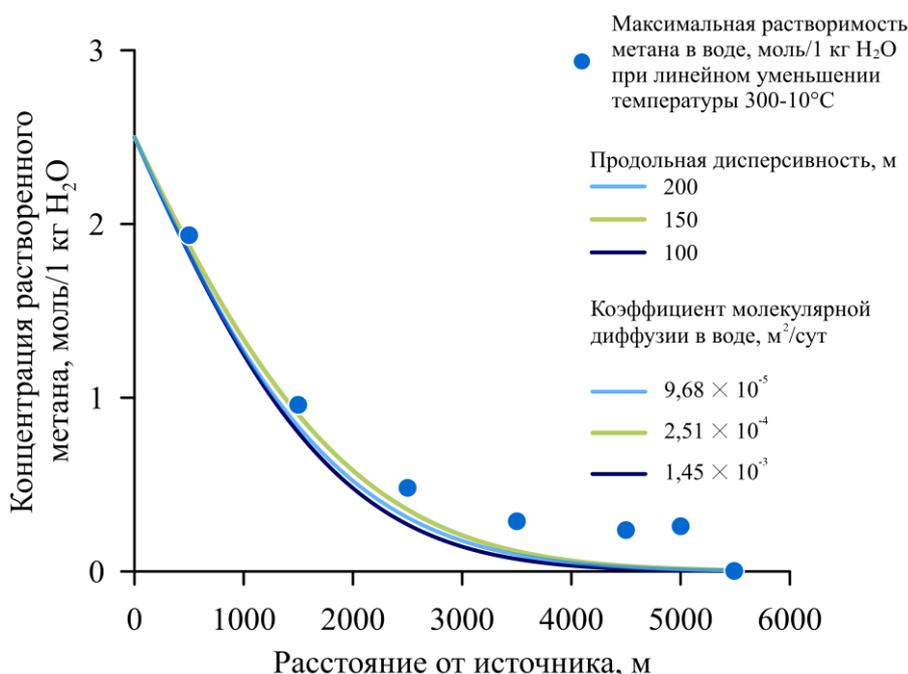


Рисунок 3.21 – Распределение концентрации растворенного метана в разломе с концентрацией в источнике 2,5 моль/1 кг H₂O, $\tau = 0,1$, при различных значениях продольной дисперсивности и коэффициента молекулярной диффузии растворенного метана в воде

Таблица 3.6 – Результаты расчета концентрации растворенного метана в придонной области

Расстояние от источника, м	Глубина от дна, м	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Данные работы [Видищева и др., 2021]
		Концентрация растворенного метана, моль/1 кг H ₂ O			
5490	10	0,0026	0,0075	0,0057	Нет данных
5498	2	0,0025	0,0074	0,0056	0,00648
5499	1	0,0025	0,0074	0,0056	0,00218

Согласно полученным результатам расчётов концентраций в верхней части разреза донных отложений, была рассчитана разгрузка растворенного метана по разлому Гидратный, в предпосылке постоянства средней ширины и остальных параметров по всей длине разлома, но без учета доли (около ¼ всей длины разлома) сегментов второй и третьей группы, выделенных в работе [Solovyeva et al.], с толщиной перекрывающих осадков более 10 метров. Основанием для не учета этих сегментов являются данные работы [Видищева и др., 2021], где показан профиль опробования донных отложений на содержание метана, который не показал заметного увеличения его концентрации в зоне сегмента второго типа, соответственно, можно предположить, что поток метана, в области перекрытия мощной толщиной осадков, перераспределяется во всех направлениях за счет диффузионных процессов и, видимо, более значительным становится вклад процесса окисления в придонной части. Результаты расчета приведены в Табл. 3.7, можно отметить, что, в рамках принятой схематизации, расчетная разгрузка растворенного метана через разлом Гидратный составляет 197,1-583,4 т/год. Оценочная величина ресурсов условных углеводородов в осадочных бассейнах Байкала, приведенная в работе [Конторович и др., 2007] составляет 500 млн. т, соответственно, рассчитанная в этой работе разгрузка по одной из крупнейших структур центральной котловины озера не противоречит значениям оцененных ресурсов.

В качестве еще одного критерия для оценки адекватности полученных значений разгрузки растворенного метана могут быть использованы данные о пузырьковой разгрузке метана, полученные по результатам обработки гидроакустических исследований, приведенные в работах Макарова М.М. [Макаров, 2016]. В его работах исследуются фокусированные факелообразные пузырьковые выходы газа, которые представляют собой совместную разгрузку вод с растворенным метаном и отдельной газовой фазы в виде пузырьков. Так, согласно Табл. 3.2, разгрузка по структуре «Санкт-Петербург», составляет 74,2-92,1 т/год. Важно отметить, что описанная в разделе 0 модельная схематизация для аналитических расчетов не может быть применена для расчета разгрузки по структуре

фокусированного выхода углеводородов, где идет значительная разгрузка метана в газообразном виде, однако можно получить ориентировочную оценку для разгрузки по участку площадью, соответствующей структуре «Санкт-Петербург», но с параметрами, соответствующими модели, определенной в разделе 0. Площадь сечения канала структуры пузырькового выхода газа, исходя из данных о ее строении, представленных в работе [Пятилова и др., 2022], составляет 1011,8 тыс. м². Расход растворенного метана в диапазоне концентраций растворенного метана, представленном в Табл. 3.8, составит 15-44 т/год, что, в целом, вполне соответствует данным [Макаров, 2016] и показывает заниженные значения разгрузки по структуре, при условии применения для расчёта несколько заниженных «средних» параметров для разлома, также важно отметить, что эта доля приходится только на ту часть метана, которая мигрирует по разлому в растворенном в подземных водах виде.

Таблица 3.7 – Результаты расчета разгрузки растворенного метана по разлому Гидратный

Длина сегментов первого типа, км	Концентрация растворенного метана в придонной части, моль/1 кг Н ₂ О	Разгрузка растворенного метана, т/год
45	0,0025	197
	0,0056	442
	0,0074	583

Таблица 3.8 – Результаты расчета разгрузки растворенного метана по структуре Санкт-Петербург

Площадь структуры, м ²	Концентрация растворенного метана в придонной части, моль/1 кг Н ₂ О	Разгрузка растворенного метана, т/год
1011770	0,0025	15
	0,0056	33
	0,0074	44

Согласно описанным выше критериям, результаты расчета разгрузки растворенного метана по разлому Гидратный можно принять оценочными. Был произведён пересчет суммарной разгрузки растворенного метана по разлому Гидратный на долю углерода, результаты которого представлены в Табл. 3.9.

Таблица 3.9 – Результаты расчета разгрузки углерода растворенного метана по разлому Гидратный

Концентрация растворенного метана в придонной части, моль/1 кг H ₂ O	Разгрузка растворенного метана, т/год	Доля диффузионной разгрузки во вмещающие отложения, %	Разгрузка углерода, т/год
0,0025	197,1	99.90	11
0,0056	441,5	99.78	25
0,0074	583,4	99.70	33

3.2. Выводы к главе 3

1. В акваторию озера Байкал разгружается значительное количество углеводородов природного генезиса, представленных как нефтью и нефтепродуктами, так и газами, миграция которых влияет, в том числе и на состав поровых вод донных отложений.

2. Разработанная модель для аналитических расчётов конвективно-дисперсионного переноса по единичной трещине подходит для решения задач переноса с учетом принятых допущений.

3. Результаты расчета концентрации растворенного метана при принятых параметрах для глубины 1 м – 0,0025-0,0074 моль/кг H_2O показали удовлетворительное совпадение с результатами опробования придонных отложений –0,00218 моль/кг H_2O .

4. Расчёты разгрузки растворенного метана по зоне, соответствующей площади структуры пузырькового выхода газа «Санкт-Петербург» показали диапазон 15-44 т/год, что не противоречит результатам гидроакустических исследований, показавшим пузырьковую разгрузку в этой структуре 74,2-92,17 т/год.

5. Расчёты суммарной разгрузки растворенного метана для сегментов разлома Гидратный, перекрытых отложениями минимальной мощности (до 10 м), показали следующий диапазон значений: 197-583 т/год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена изучению миграции растворенных веществ различного генезиса в подземных водах, разгружающихся в озеро Байкал. Техногенные миграционные процессы рассмотрены на примере одного из самых заметных объектов среди источников загрязнения подземных вод на побережье – территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината. С помощью трехмерной геомиграционной модели, разработанной в программном комплексе MODFLOW-2005 и MT3DMS, был рассмотрен массоперенос консервативного вещества с калибрацией по показателю минерализации подземных вод, массоперенос неконсервативного вещества с калибрацией по содержанию растворенных нефтепродуктов в подземных водах, а также теплотперенос с верификацией по значениям температуры подземных вод. Материалами для верификации эпигнозных расчетов являлись имеющиеся данные двадцатилетнего мониторинга состава и свойств подземных вод на территории комбината. При моделировании рассматривалась верхняя часть разреза, которая включает наиболее подверженную техногенному воздействию часть потока подземных вод неоген-четвертичного водоносного комплекса. Плановая протяженность модели формировалась с учетом охвата известных источников загрязнения подземных вод.

В ходе изучения природной миграции растворенного метана в разломной зоне дна озера Байкал была создана концептуальная модель процесса, учитывающая основные компоненты конвективно-дисперсионного переноса. Проведена адаптация аналитического решения, предложенного в работе [Tang et al, 1981], к приведенной модели. Результаты расчетов позволили дать оценку скорости фильтрации в разломной зоне, показали высокую чувствительность распределения концентраций растворенного метана в разломной зоне от принятого значения коэффициента молекулярной диффузии растворенного метана в воде. Вариантные расчеты для небольшого диапазона значений параметра продольной дисперсивности выявили существенную роль этого показателя к виду профиля концентрации растворенного метана в разломной зоне. Получены расчеты для комбинации параметров, позволяющие получить профиль концентрации растворенного метана близкий к значениям максимальной растворимости метана. Эти расчеты показали значения концентраций растворенного метана для придонной части разреза близкие к данным опробования донных отложений [Видищева и др., 2021]. Верификация разработанной модели разгрузки растворенного метана для площади разлома, аналогичной структуре фокусированного пузырькового выхода газа показала сопоставимые значения.

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Разработанный на языке Python код для аналитических расчётов конвективно-дисперсионного переноса по единичной трещине подходит для решения задач переноса по разломной зоне с учетом принятых допущений

2. Результаты расчета концентрации растворенного метана при принятых параметрах для глубины 1 м – 0,0025-0,0074 моль/кг H₂O показали удовлетворительное совпадение с результатами опробования придонных отложений –0,00218 моль/кг H₂O.

3. Расчёты разгрузки растворенного метана по зоне, соответствующей площади структуры пузырькового выхода газа «Санкт-Петербург» показали диапазон 15-44 т/год, что не противоречит результатам гидроакустических исследований, показавшим пузырьковую разгрузку в этой структуре 74,2-92,17 т/год.

4. Расчёты суммарной разгрузки растворенного метана для сегментов разлома Гидратный, перекрытых отложениями минимальной мощности (до 10 м), показали следующий диапазон значений: 197-583 т/год.

5. Разработанная трехмерная геомиграционная модель с учетом тепло- и массопереноса контаминантов на территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината удовлетворительно воспроизводит имеющиеся данные двадцатилетнего мониторинга неоген-четвертичного водоносного комплекса по уровням подземных вод, по минерализации, по температуре и по содержанию растворенных нефтепродуктов.

6. Установлено положение и режим основных источников теплового загрязнения и растворенного загрязнения на территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината.

7. В результате последовательной калибровки моделей массо- и теплопереноса установлено, что для модели тепломассопереноса существенную роль играет теплообмен с кровлей пласта, неучет которого при калибровке модели приводит к завышенному значению параметра продольной термодисперсивности.

8. Перехватывающий водозабор, действовавший на территории предприятия, до закрытия принимал до 50% растворенных минеральных веществ. Соответственно, в настоящее время, без водоотбора, массовый расход растворенных минеральных веществ с территории возрос вдвое. Возможно, в перспективе, из-за уменьшения интенсивности источников загрязнения массовый расход разгрузки растворенных минеральных веществ сократится (часто интенсивность источников угасает экспоненциально), однако для численной характеристики этого процесса, необходимо ведение длительного (около 5 лет) регулярного мониторинга. Таким образом, эпигнозные расчеты показывают значимость вклада перехватывающего водозабора и источников загрязнения на разгрузку

растворенных минеральных веществ в Байкал.

9. Эпигнозные расчеты показали, что основное уменьшение количества растворенных нефтепродуктов в подземных водах территории БЦБК связано с процессами биоразложения, описание которых производилось согласно минимальному из характерных, согласно литературным данным, значению константы деструкции, уточнение этого параметра возможно при проведении регулярного площадного мониторинга. Также, можно отметить, что около 10% всех растворенных нефтепродуктов, поступивших из источников загрязнения в водоносный горизонт, разгрузилось, в итоге, в озеро, при этом, в перехватывающий водозабор попало лишь около 5%. При сопоставлении массового расхода растворенных нефтепродуктов в озеро и в перехватывающем водозаборе, можно отметить, что их величины на период функционирования водоотбора – сопоставимы. Массовая разгрузка растворенных нефтепродуктов за двадцатилетний период могла привести к разгрузке 32 тыс. м³ загрязненных вод в озеро Байкал.

10. Проведенные прогнозные расчеты для определения распространения минерального загрязнения, реализованные в двух постановках: первая, при которой источники загрязнения остались неизменными; вторая – предусматривала извлечение источников поступления загрязнения, также каждая постановка включала два варианта с запуском перехватывающего водозабора и без него; показали, что в первой постановке разгрузка растворенных минеральных веществ через 10 лет будет выше фонового значения на ~35%, а при работающем перехватывающем водозаборе – на ~15%, при этом кумулятивная масса разгрузившихся минеральных веществ будет ниже на ~20%, чем в варианте без водоотбора. В результате расчетов согласно второй постановке, показано, что разгрузка растворенных минеральных веществ в озеро достигнет фонового значения спустя 8 лет, при этом, при функционирующем перехватывающем водозаборе, на год раньше, а кумулятивная масса разгрузившихся минеральных веществ будет ниже на ~5%, чем в варианте без водоотбора. Соответственно, наибольший вклад в реабилитацию подземных вод территории от консервативного минерального загрязнения будет внесен за счет устранения источников поступления загрязнения, а дополнительное включение перехватывающего водозабора позволит несколько ускорить процесс очищения подземных вод.

11. Проведенные прогнозные расчеты для двух аналогичных вариантов реабилитации территории показали, что в первой постановке разгрузка растворенных нефтепродуктов через 10 лет будет выше фонового значения на порядок, как и при работающем перехватывающем водозаборе, при этом, кумулятивная масса разгрузившихся

нефтепродуктов будет ниже на ~15%, чем в варианте без водоотбора. В результате расчетов согласно второй постановке, показано, что разгрузка растворенных нефтепродуктов в озеро достигнет допустимого значения спустя 7 лет, при этом, при функционирующем перехватывающем водозаборе, на два года раньше, а кумулятивная масса разгрузившихся минеральных веществ будет ниже на ~5%, чем в варианте без водоотбора. Соответственно, наибольший вклад в реабилитацию подземных вод территории от неконсервативного минерального загрязнения, помимо процессов природного биоразложения, будет внесен за счет устранения источников поступления загрязнения, а дополнительное включение перехватывающего водозабора позволит несколько ускорить процесс очищения подземных вод.

Согласно результатам исследований можно сформулировать следующие рекомендации:

1. В рамках исследования процессов миграции растворенных контаминантов на территории БЦБК, а также для оценки скорости процессов самоочищения подземных вод, рекомендуется проведение регулярного по времени площадного мониторинга в глубоких (более 15 м) скважинах, расположенных ниже по потоку подземных вод от выявленных источников поступления загрязнения. Также, ввиду значительной роли процессов гидродисперсии и биоразложения в формировании плюмов загрязнения, требуется выполнение специальных опытно-миграционных исследований на площадке предприятия.

2. Анализ данных мониторинга, проведенного ранее на территории БЦБК, свидетельствует о наличии источников загрязнения подземных вод. Результаты модельных расчетов показали, что без их ликвидации, разгрузка контаминантов в озеро не прекратится длительное время. Соответственно, для реабилитации подземных вод территории необходимо выполнение целого ряда работ, в том числе и проведение изысканий для уточнения положения и объемов источников загрязнения, устранение которых, согласно проведенным прогнозным расчетам, вносит наибольший вклад в реабилитацию подземных вод территории. Также, на основе разработанной геомиграционной модели и дополнительных данных, полученных в ходе предлагаемых исследований, возможна оптимизация системы реабилитации на основе модельного анализа различных сценариев включая:

- самореабилитацию подземных вод при условии ликвидации источников загрязнения;
- запуск и оптимизацию режима работы перехватывающего водозабора;

- проверку других способов реабилитации, например, создание перехватывающих реакционных барьеров в водоносном пласте.

Реализация проекта реабилитации подземных вод территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, с устранением выявленных источников поступления загрязнения, а также запуск перехватывающего водозабора позволят в течение нескольких лет привести разгружающиеся в Байкал подземные воды к составу, соответствующему определенным нормам [Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 83...] допустимого воздействия.

3. Опробованная методика аналитических расчётов с использованием модели конвективно-дисперсионного переноса по трещине подходит для решения задач переноса по разломной зоне с учетом принятых допущений и может быть использована для оценки разгрузки флюидов через разломные зоны дна водоемов, при условии минимальной толщи перекрывающих их отложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Опубликованная

1. Абрамов В.Ю., Пятаев А.А. Возможность формирования углеводородных систем термометаморфического генезиса и роль гидротермальных сверхкритических флюидов // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2021. – Т.16. – № 1. – С. 1-16.
2. Алексеев Л.П., Георгиевский В.Ю., Аниканова М.Н., Резников С.А., Якунина О.В., Аджиев Р.А., Черногаева Г.М., Пастухов Б.В. Анализ современного состояния озера Байкал по данным мониторинга Росгидромета // Метеорология и гидрология. – 2019. – № 10. – С. 18-29.
3. Аниканова М.Н., Панченко Л.А., Кудринская Г.Б. Результаты контроля качества воды оз. Байкал в 100-метровом створе в районе Байкальского целлюлозно-бумажного комбината // Современные фундаментальные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод России: материалы научной конференции. – Азов, 2009. – Ч. 1. – С. 27-30.
4. Аниканова М.Н. Многолетняя динамика гидрохимических показателей на контрольном створе оз. Байкал // Актуальные вопросы рыболовства, рыбоводства (аквакультуры) и экологического мониторинга водных экосистем: материалы научной конференции АзНИИРХ. – Ростов-на-Дону: ФГБНУ «АзНИИРХ», 2018. – С. 233-235.
5. Арцев А.И. Проектирование водозаборов подземных вод / Арцев А.И., Бочеввер Ф.М., Лапшин Н.Н., Орадовская А.Е., Хохлатов Э.М.; под ред. Ф.М. Бочеввера. – М. : Стройиздат, 1976. – 292 с.
6. Афолина, Т.Е. Потоки углеводородных соединений в оз. Байкал, процессы их накопления и преобразования в донных осадках: автореф. дис. ... д-ра. геогр. наук: 25.00.36/Афолина Татьяна Евгеньевна. – М., 2005. – 36 с.
7. Афолина Т.Е. Оценка эколого-геохимического состояния р. Селенги и селенгинского мелководья // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2012.– Т.67. – № 8. – С. 37-42.
8. Афолина Т.Е., Коломина Т.М., Пономаренко Е.А., Слаута А.А. Оценка качества водных ресурсов в прибрежной части оз. Байкал и источники их загрязнения // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – Т. 101. – № 6. – С. 37-43.
9. Ахманов Г.Г., Хлыстов О.М., Соловьева М.А., Ефремов В.Н., Видищева О.Н., Маццини А., Кудаев А.А., Буланова И.А., Барымова А.А., Гордеев Е.К., Деленгов М.Т.,

Егошина Е.Д., Сорокоумова Я.В., Понимаскин П.О. Открытие новой гидратоносной структуры на дне оз. Байкал // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2018. – № 5. – С. 111-116.

10. Балаян А.Э., Саксонов М.Н., Бархатова О.А., Стом Д.И. Особенности биоиндикации нефтяного загрязнения и поверхностно-активных веществ на байкальских гидробионтах // Морские биологические исследования: достижения и перспективы: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, приуроченной к 145-летию Севастопольской биологической станции. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. – Т. 3. – С. 17-20.

11. Белозерцева И.А., Воробьева И.Б., Власова Н.В., Гагаринова О.В., Янчук М.С., Лопатина Д.Н. Экологическое состояние побережья озера Байкал и его влияние на загрязнение озера // Успехи современного естествознания, 2018. – № 11. – С. 85-95.

12. Беркин Н.С., Макаров А.А., Русинек О.Т. Байкаловедение: учебное пособие. Иркутск: Издательство Иркутского государственного университета, 2009. – 291 с.

13. Богданов А.В., Шатрова А.С., Тюкалова О.В., Шкрабо А.И. Экологически безопасная технология переработки накопленных коллоидных осадков шлам-лигнина ОАО "Байкальский ЦБК" // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология, 2018. – Т. 8. – № 3. – С. 126-134. DOI: 10.21285/2227-2925-2018-8-3-126-134

14. Бухаров А.А., Мазукабзов А.М., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Станевич А.М., Складов Е.В., Федоровский В.С. Эволюция Земли в летописи Байкала // Развитие жизни в процессе абиотических изменений на Земле: материалы научно-практической конференции (пос. Листвянка Иркутской области, 18-20 марта 2008 г.) / под ред. О.Т. Русинек, В.А. Фиалкова. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2008. С. 88-101.

15. Бэр, Я. Физико-математические основы фильтрации воды / Я. Бэр, Д. Заславски, С. Ирмей ; пер. с англ. В. В. Данилова, А. А. Шарбатяна ; под ред. В. Н. Кунина, Ф. М. Бочевера. – Москва : Мир, 1971. – 452 с. – (Науки о Земле ; т. 41).

16. Веригин, Н. Н. Диффузия и массообмен при фильтрации жидкостей в пористых средах / Н. Н. Веригин, Б. С. Шержуков // Развитие исследований по теории фильтрации в СССР (1961–1967 гг.). – Москва : Недра, 1969. – С. 237–331.

17. Ветров В.А., Кузнецова А.И. Микроэлементы в природных средах региона озера Байкал / Российская академия наук, Сибирское отделение, Институт геохимии; научный редактор М.И. Кузьмин. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, Научно-исследовательский центр ОИГГМ, 1997. – 234 с.

18. Видищева О.Н., Ахманов Г.Г., Соловьева М.А., Мащини А., Хлыстов О.М.,

Егошина Е.Д., Кудаев А.А., Корост Д.В., Полудеткина Е.Н., Морозов Н.В., Григорьев К.А. Особенности разгрузки углеводородных газов вдоль разлома Гидратный (озеро Байкал). Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, 2021. – № 3. – С. 3-16.

19. Видищева, О.Н. Особенности генерации и миграции углеводородных флюидов в рифтовом бассейне озера Байкал : дис. ... канд. геол.-мин. наук : 1.6.11 / Видищева Олеся Николаевна. – М., 2023. – 122 с.

20. Вилор Н.В. Геотермальная и геохимическая активность крупных современных региональных разломов // Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы: материалы всероссийского совещания (6–9 октября 2015 г.). / Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2015. – С. 43-46.

21. Галазий Г.И., Тарасова Е.Н., Ломоносов И.С. Сульфаты — индикатор сточных вод БЦБК в водах Байкала // ЭКВАТЭК-2000: IV Международный конгресс «Вода и технология». — М., 2000. — С. 617–618.

22. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Андреев Ю.А., Аджиев Р.А. Распределение метана в водах озера Байкал // Водные ресурсы. – 2023. – Т. 50. – № 3. – С. 308–323.

23. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Андреев Ю.А., Михайленко О.А. Метан в воде и донных отложениях озера Байкал // Водные ресурсы. – 2019. – Т. 46. – № 5. С. 511–522.

24. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Цибарт А.С., Смирнова М.А. Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) // Почвоведение. – 2015. – № 10. – С. 1195-1209.

25. Геокриологическая карта СССР, масштаб 1:2 500 000 / Ершов Э.Д., Кондратьев К.А., Логинов В.Ф., Сычев И.К. и др. — Гидроспецгеология, 1991. — 16 с.

26. Голдобин Д.С. Нефиковская диффузия и аккумуляция газового метана в глубоководных донных отложениях // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. – 2012. Т. 22. – № 4. – С. 39-43.

27. Голубев В.А. Геотермия Байкала / Новосибирск : Наука, Сибирское отделение, 1982. – 150 с.

28. Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне / В.А.Голубев; науч.ред. И.С.Ломоносов. – М. : Гео, 2007. – 218 с.

29. Гольмшток А.Я., Дучков А.Д., Хатчинсон Д.Р., Ханукаев С.Б., Ельников А.И. Оценки теплового потока на озере Байкал по сейсмическим данным о нижней границе слоя газогидратов // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 39. – № 10. – С. 1677-1691.

30. Горшков А.Г., Маринайте И.И., Земская Т.И., Ходжер Т.В. Современный уровень нефтепродуктов в воде озера Байкал и его притоков. Химия в интересах устойчивого развития. – 2010. – № 18. – С. 711-718.
31. ГОСТ 17.4.1.02-83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. — М.: Стандартиформ, 1983. — 15 с.
32. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Лист М-48 (Улан-Удэ). Объяснительная записка / под ред. И.С. Петрова. СПб.: ВСЕГЕИ, 2015. 50 с. + 1 л. карты.
33. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2007 году». – Иркутск: Изд. Сиб. филиала «Росгеолфонд», 2003. – 443 с
34. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2007 году». – Иркутск: Изд. Сиб. филиала «Росгеолфонд», 2008. – 443 с.
35. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2012 году». – Иркутск: Сибирский филиал ФГУНПП «Росгеолфонд», 2013. – 436 с.
36. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2021 году». – Иркутск: ФГБУН Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2022. – 370 с.
37. Гранин Н.Г., Мизандронцев И.Б., Обжиров А.И., Верещагина О.Ф., Гнатовский Р.Ю., Жданов А.А. Окисление метана в водной толще озера Байкал // Доклады академии наук. – 2013. – Т. 451. – № 3. – С. 332–335.
38. Грачев М. А. О современном состоянии экологической системы озера Байкал / Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 156 с.
39. Диденков Ю.Н., Проскурякова З.В. Рифтогенный возобновляемый источник пресных вод Байкальского региона // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. – 2017. – Т. 40. – № 3. – С. 70–81.
40. Диденков Ю.Н., Бычинский В.А., Хаустов В.В., Мартынова М.А., Чернева В.А., Проскурякова З.В., Чеснокова М.С. Байкальская рифтовая зона – источник возобновляемых ресурсов ультрапресных вод и углеводородов // Подземная гидросфера: Материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием / Институт земной коры СО РАН: Иркутск, 2021. – С. 326-330.
41. Домышева В.М., Сороковикова Л.М., Синюкович В.Н., Онищук Н.А., Сакирко М.В., Томберг И.В., Жученко Н.А., Голобокова Л.П., Ходжер Т.В. Ионный состав воды озера Байкал, его притоков и истока реки ангара в современный период //

Метеорология и гидрология. – 2019. – Т. 44. – № 10. – С. 687-694.

42. Другов Ю.С., Родин А.А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 270 с.

43. Дучков А.Д. Газогидраты метана в осадках озера Байкал // Российский химический журнал. – 2003. – Т. XLVII. – № 3. – С. 91-100.

44. Дучков А.Д., Аюнов Д.Е., Ян П.А., Сивцев А.И., Соколова Л.С. Теплопроводность пород и оценки теплового потока в Лено-Анабарском междуречье (Сибирская платформа) // Геология и геофизика. – 2023. – № 6. – Т. 64. – С. 858-869. DOI: 10.15372/GiG2022143

45. Жузе Т.П. Миграция углеводородов в осадочных породах / Т.П. Жузе. – М. : Недра, 1986. – 188 с.

46. Захаренко А.С., Пименов С.Н., Иванов В.Г., Земская Т.И. Окисление метана в водной толще районов газо- и нефтепроявлений Среднего и Южного Байкала // Микробиология. – 2015. – Т. 84. – № 1. – С. 98-106. DOI: 10.1134/S0026261715010108.

47. Здоровеннов Р.Э., Митрохов А.В., Пальшин Н.И., Здоровеннова Г.Э., Ефремова Т.В., Тержевик А.Ю. Высокоточные изменения температуры и концентраций растворенных газов в природных областях водоемов // Всероссийская конференция по крупным внутренним водоёмам (V Ладожский симпозиум): сборник научных трудов конференции. СПб.: Издательство «Лема», 2016. – С. 149-151.

48. Казак Е. С., Сорокоумова Я. В., Ахманов Г. Г., Корзун А. В., Преснякова В. М., Казак А. В. Изучение состава поровых растворов косвенным методом водных вытяжек. Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2018. – № 4. – С. 54–71.

49. Карта естественных ресурсов подземных вод СССР: м-б 1:7 500 000 / науч. ред. Зекцер И.С., Попов О.В. — Москва : ГУГК, 1983 — 1 к.

50. Качество поверхностных вод Российской Федерации: ежегодник. 2014 / под ред. А.И. Петрова. — М.: Гидрохимический институт, 2015. – 250 с.

51. Клеркс Ж., Земская Т.И., Матвеева Т.В. и др. Гидраты метана в поверхностном слое глубоководных осадков озера Байкал // Доклады РАН. – 2003. – Т. 393. – № 6. – С. 822-826.

52. Коллектив участников проекта "Байкал-бурение". Позднекайнозойская палеоклиматическая запись в осадках оз. Байкал / В.С. Антипин, Т.В. Афонина, О.А. Бадалов [и др.] // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41. – № 1. – С. 3-32.

53. Колотов А. А., Рихванова М. П., Симонов Е. А., Сутурин А. Н. Байкальский ЦБК – Объект накопленного экологического ущерба на фоне объекта всемирного наследия. ЭПЦ

«Беллона», 2021. – 136 с.

54. Конторович А.Э., Каширцев В.А., Москвин В.И., Бурштейн Л.М., Земская Т.И., Калмычков Г.В., Костырева Е.А., Хлыстов О.М. Нефтегазоносность отложений озера Байкал // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – № 12. – С. 1346-1356. DOI: 10.1016/j.rgg.2007.12.007.

55. Кузьмин М.И., Калмычков Г.В., Гелетий В.А. [и др.] Первая находка газогидратов в осадочной толще озера Байкал // Доклады Академии наук. – 1998. – Т. 362. – № 4. – С. 541–543. DOI: 10.1134/S1028334X9804001X.

56. Кузьмин М.И., Карабанов Е.Б., Каваи Т., Вильямс Д., Бычинский В.А., Кербер Е.В., Кравчинский В.А., Безрукова Е.В., Прокопенко А.А., Гелетий В.Ф., Калмычков Г.В., Горегляд А.В., Антипин В.С., Хомутова М.Ю., Сошина Н.М., Иванов Е.В., Хурсевич Г.К., Ткаченко Л.Л., Солотчина Э.П., Йошида Н., Гвоздков А.Н. Глубоководное бурение на Байкале – основные результаты // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42. – № 1-2. – С. 8-34. DOI: 10.1016/S0895-9811(01)00018-6.

57. Кузьмин М.И., Лут Б.Ф., Шерстянкин П.П. Обручевский сброс в Байкальской впадине как объект исследований наук о Земле // География и природные ресурсы. – 2004. – № 2. – С. 35–40.

58. Купцов С.М. Теплофизические свойства пластовых жидкостей и горных пород нефтяных месторождений. М.: ООО «НедраБизнесцентр», 2008. – 205 с.

59. Куранов, Н. П. Теория массопереноса в безнапорных фильтрационных потоках / Н. П. Куранов // Методы расчета процессов массопереноса в гидрогеологических исследованиях : труды института «ВОДГЕО». – Москва, 1984. – С. 14–18.

60. Ламакин В.В. Неотектоника Байкальской впадины. М.: Наука, 1968. – 247 с.

61. Лехов А.В. Физико-химическая гидрогеодинамика. М.: КДУ, 2010. – 500 с.

62. Лехов В.А., Поздняков С.П., Бакшевская В.А. Экспериментальное изучение и численное моделирование влияния диффузии на миграцию загрязнения в неоднородных песчано-глинистых отложениях // Инженерная геология. – 2017. – № 5. – С. 60–71.

63. Лещиков Ф.Н. Мерзлые породы Приангарья и Прибайкалья. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1978. – 145 с.

64. Логачев Н.А. Главные структурные черты и геодинамика Байкальской рифтовой зоны // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 2. – № 1-2. – С. 5-18.

65. Лозовой Д.В. Влияние нефтяных углеводородов на байкальские организмы в естественных и лабораторных условиях // Георесурсы. – 2012. – Т. 43. – № 1. – С. 53–58. DOI: 10.18599/grs.2012.1.53-58.

66. Ломоносов И.С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1974. – 166 с.
67. Лукнер, Л. Моделирование миграции подземных вод : монография / Л. Лукнер, В. М. Шестаков. — Москва : Недра, 1986. — 208 с.
68. Лямина, Л.А. Гидрогеологические условия формирования низкоэнталийных минеральных вод в массивах кристаллических пород (на примере месторождения Кульдур, Еврейская автономная область) : дис. ... канд. геол.-мин. наук : 1.6.6 / Лямина Лариса Андреевна. – М., 2022. – 162 с.
69. Лямина Л.А., Харитоновна Н.А., Расторгуев А.В., Челноков Г.А., Брагин И.В. Концептуальная модель формирования азотных термальных вод в кристаллических массивах пород (на примере месторождения Кульдур) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2022. – № 2. – С. 78-90. DOI: 10.33623/0579-9406-2022-2-78-90.
70. Макаров, М.М. Пузырьковые выходы метана из донных отложений озера Байкал: дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.28 / Макаров Михаил Михайлович. – Иркутск, 2016. – 116 с.
71. Макаров, С.А. Современный морфолитогенез на юге Восточной Сибири : дис. ... докт. геогр. наук : 25.00.25 / Макаров Станислав Александрович. – М., 2016. – 360 с.
72. Мамонтов А.А., Мамонтова Е.А. Стойкие органические загрязнители солзанского полигона БЦБК // VIII Международная Верещагинская Байкальская конференция, 8–14 сентября 2025 г.: тезисы докладов и стендовых сообщений. Иркутск: Издательство ИГУ, 2025. – С. 371-372.
73. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Опыт-но-миграционные работы в водоносных пластах. М.: Недра, 1986. – 240 с.
74. Мироненко, В. А. Проблемы гидрогеоэкологии : монография : в 3 т. Т. 2 : Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов / В. А. Мироненко, В. Г. Румынин. – Москва : Издательство Московского государственного горного университета, 2002. – 610 с.
75. Намиот А.Ю. Растворимость газов в воде : справочное издание / А.Ю. Намиот. М. : Недра, 1991. – 167 с.
76. Никуленков, А.М. Экспериментальное обоснование миграционных параметров песчано-глинистых отложений нижнего кембрия и верхнего венда для оценки безопасности эксплуатации хранилищ низко- и среднеактивных отходов (г. Сосновый Бор, Ленинградская область) : дис. ... канд. геол.-мин. наук : 25.00.07 / Никуленков Антон

Михайлович. – СПб., 2011. – 148 с.

77. Павлова О.Н., Ломакина А.В., Горшков А.Г., Сулова М.Ю., Лихошвай А.В., Земская Т.И. Микробные сообщества и их способность окислять n-алканы в районе разгрузки газо-нефтедержащих флюидов в среднем Байкале (мыс Горевой Утес) // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. – 2012. – № 5. – С. 540-545.

78. Паутов, Д.В. Влияние природных и техногенных факторов на формирование подземных вод в районе города Усолье-Сибирское : дис. ... канд. геол.-мин. наук : 25.00.07 / Паутов Дмитрий Владимирович – Иркутск, 2002. – 161 с.

79. Пестунов Д.А., Домышева В.М., Иванов В.Г., Шамрин А.М., Панченко М.В. Пространственное распределение направления потоков CO₂ и CH₄ по акватории озера Байкал (кругобайкальская экспедиция, июнь 2013 г.) // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28. – № 9. – С. 792–800.

80. Петров В. В., Яковлев Д. В. Геохимические особенности природных вод Центральной экологической зоны Байкальской природной территории // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 95. – С. 42–53.

81. Пименов Н.В. Анаэробное окисление метана в пресных водоемах. // Тезисы докладов и стендовых сообщений четвертого Байкальского микробиологического симпозиума с международным участием «Микроорганизмы и вирусы в водных экосистемах». – 2015. – С. 32-33.

82. Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Ломоносов И.С., Колдышева Р.Я., Диденко А.А., Шерман С.И. Гидрогеология Прибайкалья / Академия наук СССР, Сибирское отделение, Институт земной коры. М.: Наука, 1968. – 170 с.

83. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 г. № 3 СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий».

84. Приказ Госкомрыболовства России № 96 от 28.04.1999. Перечень рыбохозяйственных нормативов: предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение.

85. Приказ Минприроды России от 21.02.2020 № 83 "Об утверждении нормативов предельно допустимых воздействий на уникальную экологическую систему озера Байкал и

перечня вредных веществ, в том числе веществ, относящихся к категориям особо опасных, высокоопасных, опасных и умеренно опасных для уникальной экологической системы озера Байкал" (ред. от 12.11.2021) // Собрание законодательства РФ. 2020.

86. Путилина В. С., Галицкая И. В., Юганова Т. И. Трансформация нефти и нефтепродуктов в почвах, горных породах, подземных водах. Загрязнение, инфильтрация, миграция, деградация. Метаболиты: анализ. обзор / Федер. гос. бюджет. учреждение науки Гос. публич. науч.-техн. б-ка Сиб. отд-ния Рос. акад. наук. – Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 2019. – 111 с.

87. Пятилова А.М., Ахманов Г.Г., Соловьева М.А., Хлыстов О.М. Грязевые вулканы озера Байкал (по материалам Class@Baikal). // Труды XI Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU) 2022». – 2022. – Т. IV. – С. 41-44.

88. Расторгуев А.В., Куранов П.Н. Обоснование защиты озера Байкал от загрязнения подземными водами. // Современные проблемы гидрогеологии и гидрогеомеханики: сборник докладов конференции, посвященной памяти члена-корреспондента РАН В.А. Мироненко. Санкт-Петербург, 2002. – С. 141-146.

89. Родькина И.А., Самарин Е.Н., Зеркаль О.В., Чернов М.С., Кравченко Н.С. Нейтрализация влияния Байкальского ЦБК на окружающую среду. Ч. 1 // Твердые бытовые отходы. – 2021. – № 3. – С. 49-52.

90. Российская газета. [Электронный ресурс] — URL: <https://rg.ru/>– (дата обращения – 12.03.2023).

91. Рошаль, А. А. Полевые методы определения миграционных параметров / А. А. Рошаль // Обзор ВИЭМС. Сер. Гидрогеология и инженерная геология. — Москва : ВИЭМС, 1981. — 61 с.

92. Румынин В.Г. Геомиграционные модели в гидрогеологии. СПб: Наука, 2011. – 1160 с.

93. Румынин В. Г. Теория и методы изучения загрязнения подземных вод. Учебник для вузов. СПб.: Наука, 2020. – 559 с.

94. Смородин, С.Н. Содорегенерационные котлоагрегаты : учебное пособие / Смородин С.Н., Иванов А.Н., Белоусов В.Н. – СПб : СПбГТУРП, 2010. – 164 с.

95. Сорокоумова Я.В., Расторгуев А.В. Оценка миграции растворенного метана в разломной зоне озера Байкал // Разведка и охрана недр. – 2025. – № 2. – С. 93–98.

96. Сорокоумова Я.В., Расторгуев А.В., Курбонов М.Д. Оценка продольной дисперсивности при калибровке моделей теплопереноса в грунтовых водах на

территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2024. – № 4. – С. 52–60.

97. Сорокоумова Я.В., Казак Е.С. Поровые воды донных отложений озера Байкал в области разгрузки углеводородных флюидов // Гидрогеология: прошлое, настоящее и будущее. (Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе): материалы конференции. Москва, 2024. – С. 169–173.

98. Сорокоумова Я.В., Расторгуев А.В., Моделирование миграции растворенных нефтепродуктов в грунтовых водах на территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината. // Инженерная геология. – 2023. – Т. XVIII. – № 3. – С. 66–78.

99. Состояние недр Российской Федерации в 2021 году: информ. бюллетень / ФГБУ «Гидроспецгеология». М., 2022. – Вып. 45. – 120 с.

100. Сутурин А.Н., Гончаров А.И., Дамбинов Ю.А., Куликова Н.Н., Мальник В.В., Дамбинова Е.Л., Чебыкин Е.П. Ремедиация Солзанского полигона промтоходов Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25. – № 2. – С. 41-47.

101. Сутурин А.Н. Рифтогенез и особенности биогеохимии Байкала и впадин байкальского типа. Иркутск: ИГХ СО РАН, 2023. – 320 с.

102. Фролова Н.Л., Белякова П.А., Григорьев В.Ю., Сазонов А.А., Зотов Л.В. Многолетние колебания стока рек в бассейне селенги. // Водные ресурсы. – 2017. – Т. 44, – № 3. – С. 1–13.

103. Хант Дж. Геохимия и геология нефти и газа. М.: Мир, 1982. – 703 с.

104. Хаустов А.П. Закономерности формирования подземного стока и методы его оценки. Иркутск: Издательство Иркутского университета, 1982. – 80 с.

105. Хаустов А.П., Редина М.М. Трансформация нефтепродуктов как источник токсичных загрязнений природных сред // Экология и промышленность России. – 2012. – № 12. – С. 38-44.

106. Хлыстов О.М. Новые находки газовых гидратов в донных осадках озера Байкал. // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 4. – № 8. – С. 979-981.

107. Хлыстов О.М., Горшков А.Г., Егоров А.В., Земская Т.И., Гранин Н.Г., Калмычков Г.В., Воробьева С.С., Павлова О.Н., Якуп М.А., Макаров М.М., Москвин В.И., Грачев М.А. Нефть в озере мирового наследия // Доклады Академии наук. – 2007. – Т. 414. – № 5. – С. 656-659.

108. Чебыкин Е. П., Дамбинов Ю. А., Сутурин А. Н. Многоэлементный анализ надшламовых вод карт-накопителей Байкальского целлюлозно-бумажного комбината для

выбора стратегии ремедиации территории // Вода и экология: проблемы и решения. – 2020. – Т. 84. – № 4. – С. 67-79.

109. Шенькман Б.М. Гидрогеохимическая и тепловая техногенные аномалии в районе Байкальского целлюлозно-бумажного комбината // География и природные ресурсы. – 2016. – № 5. – С. 239-246.

110. Шенькман Б.М. Уязвимость подземных вод на солзанском полигоне накопителей шлам-лигнина Байкальского целлюлозно-бумажного комбината // Водные ресурсы. – 2017. – Т. 44. – № 3. – С. 354-365.

111. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. М.: Изд-во МГУ, 1995. – 368 с.

112. Ширибон, А.А. Геология и геохимия углеводородов южнобайкальской впадины : дис. ... канд. геол.-мин. наук : 25.00.12 / Ширибон Андрей Александрович. – Иркутск., 2008. – 144 с.

113. Щетинина Е.В., Максимов В.В., Максимова Э.А. Современное состояние грунтов в районе Байкальского ЦБК по микробиологическим показателям // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем-II: материалы II Международной научной конференции. СПб.: Изд-во "Лема", 2011. – С. 210-214.

114. Янчук М. С. Нефтепродукты в поверхностных и снеговых водах юго-западного побережья озера Байкал // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2016. – Т. 18. – С. 140-149.

115. Anderson M.P. Heat as a ground water tracer // Ground Water. – 2005. – Vol. 43. – Iss. 6. – P. 951-968. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x. PMID: 16324018.

116. Appelo C.A.J, Postma D.J. Geochemistry, groundwater and pollution. CRC Press/Balkema, Amsterdam, 2005 – 683 p.

117. Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media / J. Bear. – N.Y. : Elsevier, 1972. – 764 p.

118. Chen Y.A., Chu C.K., Chen Y.P., Chu L.S., Lin S.T., Chen L.J. Measurements of diffusion coefficient of methane in water/brine under high pressure // Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences. – 2018. – Vol. 29. – P. 577-587.

119. Clarke R.H., Cleverly R. Petroleum seepage and post-accumulation migration // Geological Society, London, Special Publications. – 1991. – Vol. 59. – P. 265-271.

120. De Batist M., Canals M., Sherstyankin P. et al. [and the INTAS Project 99-1669 Team]. A new bathymetric map of Lake Baikal. 2002. [Электронный ресурс] — URL: <http://www.lin.irk.ru/intas/index.htm> (дата обращения: 10.02.2020).

121. de Marsily G. Quantitative Hydrogeology: Groundwater Hydrology for Engineers. Orlando: Academic Press, 1986. – 440 p.

122. Duan Z., Mao S. A thermodynamic model for calculating methane solubility, density, and gas phase composition of methane-bearing aqueous fluids from 273 to 523 K and 1 to 2000 bar // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2006. – Vol. 70. – P. 3369-3386.
123. Gelhar L.W., Welty C., Rehfeldt K.R. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers // *Water Resources Research*. – 1992. – Vol. 28. – № 7. – 1955-1974.
124. Gelhar L.W. Stochastic subsurface hydrology. Illustrated ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.
125. Google Colab [Электронный ресурс] — URL: <https://colab.research.google.com> веб сайт о работе в Google Colab (дата обращения: 12.11.2024).
126. Granin N., Muyakshin S., Makarov M., Kucher K., Aslamov I., Granina L., Mizandrontsev I. Estimation of methane fluxes from bottom sediments of Lake Baikal. // *Geo-Marine Letters*. – 2012. – Vol. 32. – P. 427-436. DOI: 10.1007/s00367-012-0299-6.
127. Haacke, R. R., Westbrook G. K., Riley M. S. Controls on the formation and stability of gas hydrate-related bottom-simulating reflectors (BSRs): A case study from the west Svalbard continental slope *J. Geophys. Res.* – 2008. – Vol. 113. – B05104. DOI:10.1029/2007JB005200.
128. Harbaugh A.W. MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - The Ground-Water Flow Process // *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*. – 2005. – Vol. 6-A16.
129. Irvine D.J., Simmons C.T., Werner A.D., Graf T. Heat and solute tracers: how do they compare in heterogeneous aquifers? // *Groundwater*. – 2015. – Vol. 53. – P. 10-20. DOI: 10.1111/gwat.12146.
130. Judd A., Davies G., Wilson J., Holmes R., Baron G., Bryden I. Contributions to atmospheric methane by natural seepages on the UK continental shelf // *Marine Geology*. – 1997. – Vol. 137. – No. 1-2. – P. 165-189. DOI: 10.1016/S0025-3227(96)00090-0.
131. Khlystov O., De Batist M., Shoji H., Hachikubo A., Nishio S., Naudts L., Poort J., Khabuev A., Belousov O., Manakov A., Kalmychkov G. Gas hydrate of Lake Baikal: Discovery and varieties // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2013. – Vol. 62. – P. 162-166. DOI: 10.1016/j.jseaes.2012.03.009.
132. Kuznetsov P., Wei K., Kuznetsova A., Foght J., Ulrich A., Siddique T. Anaerobic Microbial Activity May Affect Development and Sustainability of End-Pit Lakes: A Laboratory Study of Biogeochemical Aspects of Oil Sands Mine Tailings // *ACS ES&T Water*. – 2023. – Vol. 3. – No. 4. – P. 1039-1049. DOI: 10.1021/acsestwater.2c00505.
133. Langevin C.D., Thorne D.T. Jr., Dausman A.M., Sukop M.C., Guo W. SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport //

U.S. Geological Survey Techniques and Methods. – 2008. – Book 6. – Chapter A22. – 39 p. DOI: 10.3133/tm6A22.

134. McDonald M.C., Harbaugh A.W. A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey Open-File Report, 1984. – P. 83-875.

135. Neuman S. P. Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic Media // *Water Resources Research*. – 1990. – Vol. 26. – Iss. 8. – P. 1749–1758.

136. Newell C.J., Gonzales J., McLeod R.K. BIOSCREEN natural attenuation decision support system // U.S. Environmental Protection Agency. 1996. Report No. EPA/600/R-96/087. – 156 p.

137. Newell C.J., Rifai H.S., Wilson J.T., Connor J.A., Aziz J.A., Suarez M.P. Calculation and use of first-order rate constants for monitored natural attenuation studies // *Ground Water Issue*, 2002. – 28 p.

138. Oelkers E.H. Calculation of diffusion coefficients for aqueous organic species at temperatures from 0 to 350 °C // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1991. – Vol. 55. – No. 12. – P. 3515-3529. DOI: 10.1016/0016-7037(91)90049-Y.

139. Pozdniakov S.P., Lekhov V.A., Bakshevskaya V.A. Dual-domain model of advective-diffusion transport with variable mass transfer rate for long-term contaminant transport simulation at radwaste injection site // *Journal of Hydrology*. – 2022. – Vol. 606.

140. Rau G.C., Andersen M.S., Acworth R.I. Experimental investigation of the thermal dispersivity term and its significance in the heat transport equation for flow in sediments // *Water Resources Research*. – 2012. – Vol. 48. – W03511. DOI: 10.1029/2011WR011038.

141. Scheidegger A.E. General Theory of Dispersion in Porous Media // *Journal of Geophysical Research*. – 1961. – Vol. 66. – No. 10. – P. 3273-3278.

142. Schmid M., De Batist M., Granin N. G., Kapitanov V. A., McGinnis D. F., Mizandroutsev I. B., Obzhairov A. I., Wüest A. Sources and Sinks of Methane in Lake Baikal: A Synthesis of Measurements and Modeling // *Limnology and Oceanography*. – 2007. – Vol. 52. – No. 5. – P. 1824-1837.

143. Schulze-Makuch D. Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior // *Ground water*. – 2005. – Vol. 43. – Iss. 3. 2005. DOI: 443-56. DOI:10.1111/j.1745-6584.2005.0051.x

144. Solovyeva M.A., Akhmanov G.G., Mazzini A., Khabuev A.V., Khlystov O.M. The Gydratny Fault zone of Lake Baikal // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2020. – Vol. 1. – P. 368-373.

145. Sommer W., Valstar J., Gaans P., Grotenhuis T., Rijnaarts H. The impact of aquifer

heterogeneity on the performance of aquifer thermal energy storage // *Water Resources Research*. – 2013. – Vol. 49. DOI: 10.1002/2013WR013677.

146. Suarez M.P., Rifai H.S. Biodegradation rates for fuel hydrocarbons and chlorinated solvents in groundwater // *Bioremediation Journal*. – 1999. – Vol. 3. – No. 4. – P. 337-362. DOI: 10.1080/10889869991219433.

147. Tang D.H., Frind E.O., Sudicky E.A. Contaminant transport in fractured porous media: Analytical solution for a single fracture // *Water Resources Research*. – 1981. – Vol. 17. – No. 3. – P. 555-564. DOI: 10.1029/WR017i003p00555.

148. Waterloo Hydrogeologic. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.waterloohydrogeologic.com> (дата обращения: 15.08.2023).

149. Zhang K., Hu Z., Zeng F., Yang X., Wang J., Jing R. [et al.] Biodegradation of petroleum hydrocarbons and changes in microbial community structure in sediment under nitrate-, ferric-, sulfate-reducing and methanogenic conditions // *Journal of Environmental Management*. – 2019. – Vol. 249. – 109425. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109425.

150. Zheng C., Wang P. MT3DMS: A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide. Birmingham: University of Alabama, 1999. – 221 p.

Фондовая

151. Отчет «Результаты эколого-гидрогеологических работ, проведенных в северо-западной части промплощадки БЦБК в целях ликвидации влияния промстоков на оз. Байкал (Отчет эколого-гидрогеологической партии по работам в 1998-99 гг.)» Алтынников А.М. [и др.] – Мальта, 1999 г.

152. Отчет «Природно-антропогенные объекты. Район Байкальского ЦБК», Институт экологической токсикологии им. А.М. Бейма МПР России, Байкальск, 2003.

153. Технический отчет «Инженерно-экологические изыскания», ЛИН СО РАН, Грачёв М.А. [и др.] – Иркутск, 2013.

154. Отчет «Реконструкция ТЭЦ БЦБК для обеспечения эффективного теплоснабжения г. Байкальска после закрытия ОАО «Байкальский ЦБК» (угольная водогрейная котельная с резервными/пиковыми электродотлами)», Калашников А.Н. [и др.] – Чита, 2015.

155. Полевой отчет по результатам работ V Международной студенческой экспедиции, проходившей в период 20.06.18-07.07.18 «Class@Bikal-2018» / под ред.

Хлыстова О.М., Ахманова Г.Г. [и др.] – Листвянка, 2018.

156. Заключение по результатам обследования специалистами ООО «ВЭБ Инжиниринг» с 16.06.2020 по 11.07.2020 в г. Байкальске промышленной площадки ОАО БЦБК. / Чичкан Н.В. [и др.] – Москва, 2020.

157. Отчетная документация по инженерным изысканиям. Снос объектов капитального строительства на территории бывшего БЦБК ООО «АВТОДОРПРОЕКТ», / Рубцов Д.В. [и др.] – Красноярск, 2021.