

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Сорокоумова Яна Владиславовна

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

1.6.6. Гидрогеология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре гидрогеологии геологического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** – *Расторгуев Александр Владилинович*
кандидат технических наук
- Официальные оппоненты** – *Хаустов Александр Петрович*, доктор геолого-минералогических наук, профессор,
Российский университет дружбы народов
имени Патриса Лумумбы, Институт экологии,
Департамент экологической безопасности
и менеджмента качества продукции, профессор
Рыбникова Людмила Сергеевна,
доктор геолого-минералогических наук,
Институт горного дела Уральского отделения
Российской академии наук, лаборатория экологии
горного производства, главный научный сотрудник
Лубкова Татьяна Николаевна,
кандидат геолого-минералогических наук,
Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова, геологический факультет,
кафедра геохимии, старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится 17 апреля 2026 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.1 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, Главное здание МГУ, корпус «А», геологический факультет, аудитория 415.

Электронная почта: mgu.04.01@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3829>.

Автореферат разослан 11 марта 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук

Н.А. Харитонова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы 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), площадка которого размещена 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 "высокоопасных" для уникальной экологической системы озера Байкал, согласно Приказу Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 83. Таким образом, анализ сформировавшегося на данном объекте загрязнения подземных вод и оценка возможных способов их реабилитации представляют актуальную задачу.

Исследования последних десятилетий, опубликованные в работах А.Э. Конторовича, О.М. Хлыстова, Г.Г. Ахманова, О.Н. Видищевой, М.А. Соловьевой, М.М. Макарова и многих других, показывают, что в акваторию озера Байкал происходит постоянный приток углеводов природного происхождения, одним из примеров такой разгрузки является разлом Гидратный. Оценка притока в озеро углеводов естественного происхождения, среди которых наиболее часто фиксируется разгрузка метана, 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, а в 1999 г. на основе разработок сотрудников СО РАН был принят Федеральный закон «Об охране озера Байкал».

После остановки производственной деятельности, территория БЦБК и карт-накопителей с его отходами представляет собой объект накопленного вреда для окружающей среды и, в частности, для подземных вод. Характеристике техногенного воздействия на подземные воды и воды Байкала посвящены работы Г.И. Галазия, Е.Н. Тарасовой, И.С. Ломоносова, М.А. Грачева, А.В. Расторгуева, П.Н. Куранова, А.Г. Горшкова, Т.Е. Афонинной, Б.М. Шенькмана, И.А. Белозерцевой, А.В. Богданова, И.А. Родькиной, А.Н. Сутурина, А.А. Мамонтова. При решении задач, связанных с миграцией компонентов в подземных водах, существенное значение имеет изучение дисперсии, ввиду ее особой роли в формировании ореолов распространения контаминантов (вещества и тепла) в подземных водах, что описано в работах S. Neuman, A. Scheidegger, D. Schulze-Makuch, Я. Бэра, Н.Н. Веригина, Б.С. Шержукова, Ф.М. Бочевера, А.Е. Орадовской, Н.Н. Лапшина, В.М. Шестакова, Л. Лукнера, А.А. Рошаля, В.А. Мироненко, Н.П. Куранова, А.В. Лехова, В.Г. Румынина, С.П. Позднякова.

Исследования трансформации эндогенных флюидов в Байкальской котловине рассмотрены в работах И.С. Ломоносова, Ю.Н. Диденкова. Количественная оценка разгрузки метана для отдельных структур фокусированного выхода и для всей котловины озера опубликована в работах Н.Г. Гранина, М.М. Макарова. Аналитические расчеты транспорта метана в донных отложениях на примере другого региона представлены в работе Д.С. Голдобина. Оценка баланса метана в водах озера Байкал приводится в работе M. Schmid. Результаты исследования гидротерм Байкальской рифтовой зоны опубликованы в работах И.С. Ломоносова, В.А. Голубева.

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.

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.

Задачи исследований:

1. Разработать и обосновать модели тепло- и массопереноса контаминантов в подземных водах неоген-четвертичного водоносного комплекса на территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината.
2. Определить локализацию основных источников контаминантов на территории БЦБК, оценить их интенсивность и динамику формирования ореолов загрязнения от них в подземных водах.
3. Разработать и обосновать концептуальную и аналитическую модели переноса растворенного метана с подземными водами по разломной зоне в придонной части озера Байкал.
4. Оценить разгрузку растворенного метана с подземными водами по разлому Гидратный.

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 субквальной 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. 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, которые разгружаются в донные отложения озера.

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 калибровки трехмерной модели тепломассопереноса в подземных водах на территории БЦБК установлена существенная роль теплообмена с вышележащими породами зоны аэрации, неучет которого при калибровке 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.

Личный вклад автора заключается в участии 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.

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 субаквальной 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. Основные результаты исследований докладывались на научных семинарах и конференциях в период с 2017 по 2025 гг: XXIV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2017 г.); Международная научно-практическая конференция "Морские исследования и образование – MARESEDU" (Москва, 2018 г., 2024 г.); «Ломоносовские чтения» (Москва, 2019 г., 2024 г., 2025 г.); Всероссийская конференция с международным участием «Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования» (Туапсе, 2023 г.); XXIV Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока (Екатеринбург, 2024 г.); Научно-практическая конференция «Гидрогеология: прошлое, настоящее и будущее» (Москва, 2024 г.); XIX Общероссийская научно-практическая конференция и выставка «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 2024 г.); «VIII Международная геолого-геофизическая конференция и выставка «ГеоЕвразия-2025. Геологоразведочные технологии – наука и бизнес» (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 работы. Диссертационная работа изложена на 132 страницах текста, состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы из 157 наименований, включает 64 рисунка, 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** анализируются природные условия, геологическое строение, гидрогеологические условия, а также техногенная обстановка в районе Байкальского целлюлозно-бумажного комбината.

Одним самых значимых источников поступления техногенных веществ в воды озера Байкал является территория Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК), который функционировал в период 1964-2013 гг. Площадка предприятия расположена на юго-западном побережье озера Байкал в Слюдянском районе Иркутской области в г. Байкальске (Рис. 1). До 2008 года производственные стоки комбината, после обработки на очистных сооружениях, сбрасывались в озеро, позднее и до 2013 года функционировала система замкнутого водооборота. Отходы производства удалялись в карту № 11 и далее по пульпопроводу в карты бабхинского и солзанского полигонов.

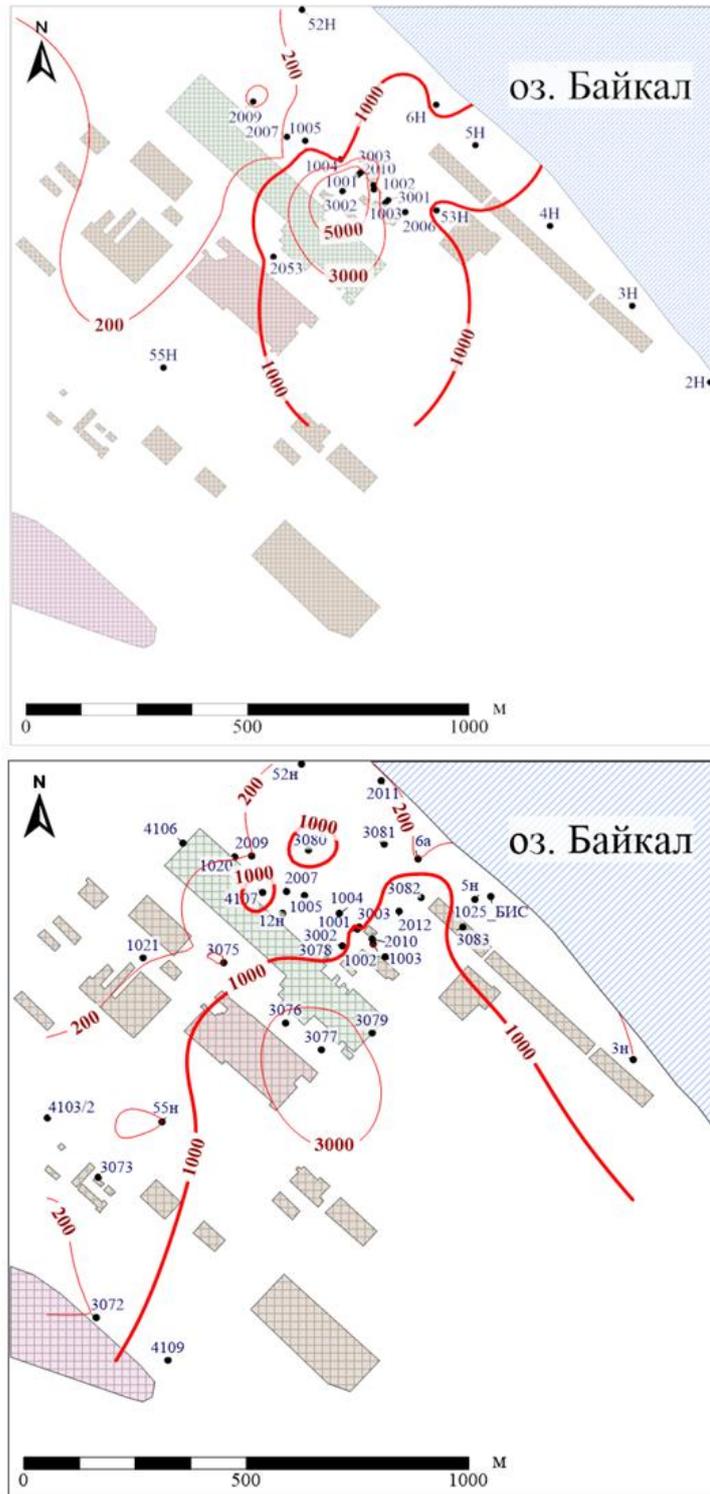


Рисунок 1. Положение изучаемого объекта¹

Рассматриваемый район относится к первой террасе озера, осложненной пролювиальными конусами выноса по долинам рек Утулик и Солзан. На территории распространен неоген-четвертичный водоносный комплекс мощностью несколько сотен метров, водовмещающие отложения которого представлены плохо отсортированными гравийно-галечниковыми и валунно-галечниковыми отложениями с включением линз и прослоев песчаного, супесчаного и иногда суглинистого состава. В плане комплекс 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 атмосферных осадков, разгрузка – в озеро Байкал. Химический состав вод гидрокарбонатный кальциево-натриевый, с минерализацией до 200 мг/л.

Факт загрязнения подземных вод на территории предприятия установлен еще в 1980-х годах, после чего были предприняты попытки мониторинга загрязнения, а также сооружение нескольких очередей перехватывающего водозабора. Основными контаминантами подземных вод среди макрокомпонентов являются ионы натрия, гидрокарбонатов, сульфатов, хлоридов, суммарное содержание которых определяет минерализацию вод. В ходе гидрогеохимических исследований в 2002 году максимальное выявленное значение минерализации составило 10250 мг/л, а в 2022 году – 4604 мг/л (Рис. 2).

¹ Российская газета. [Электронный ресурс] — URL: <https://rg.ru/>– (дата обращения – 12.03.2023), с изменениями автора диссертации



Условные обозначения

	Здание главного корпуса БЦБК		Здания и сооружения БЦБК		Скважина и её номер
	Здание ТЭЦ		Карта №11		Изолинии минерализации подземных вод число - минерализация, мг/л

Рисунок 2. Минерализация подземных вод в районе БЦБК по экстраполированным данным опробования в 2002 г. и 2022 г.

Еще одним контаминантом, характеризующим загрязнение подземных вод на территории БЦБК, являются растворенные нефтепродукты. Согласно Приказу Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 83, допустимое содержание растворенных нефтепродуктов в сточных водах, сбрасываемых непосредственно в озеро Байкал – 0,01 мг/л; однако во время гидрогеохимических исследований на площадке комбината в 2002 г. максимальное выявленное содержание растворенных нефтепродуктов составило 0,45 мг/л, а в 2022 г. – 17,3 мг/л.

Температурное поле в пределах изучаемой территории характеризуется весьма значительным диапазоном в рамках единовременного опробования в 2002 г.: 9-43°C, а в 2022 г.: 6,2-16,7°C.

Обобщение опубликованных и фондовых материалов позволяет сделать вывод о наличии ореолов контаминантов (растворенных минеральных веществ, растворенных нефтепродуктов) и тепла в подземных водах даже после остановки производственной деятельности на территории предприятия.

Во **второй главе** приводятся результаты геомиграционного моделирования распространения контаминантов в подземных водах территории БЦБК.

Описание и изучение процессов миграции подземных вод производится при помощи численного моделирования процесса массопереноса, для этого сам процесс представляется в виде математической модели конвективно-дисперсионного переноса, сформулированной в работе С.Д. Langevin²:

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

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; \mathbf{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.

Для решения поставленных задач была разработана трехмерная геомиграционная модель в программном комплексе MODFLOW-2005 и MT3DMS.

² 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.

Моделируемая область представляет собой участок берега озера Байкал, охватывающий известные очаги загрязнения. Основное направление потока подземных вод – в сторону озера Байкал, характер поверхности потока – безнапорный.

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. Северная и южная границы непроницаемые (второго рода), проведены по линиям тока подземных вод; восточная граница, приуроченная к контуру озера Байкал, схематизирована условием первого рода; на западной границе модели задан градиент потока подземных вод.

Внутренним граничным условием на модели является перехватывающий водозабор, который функционировал 12 лет с неравномерным дебитом.

Фильтрационные свойства неоген-четвертичного водоносного комплекса задавались согласно ранее разработанной геофильтрационной модели, опубликованной в работе Расторгуева А.В. и Куранова П.Н., для небольшого участка территории БЦБК, описывающего область влияния перехватывающего водозабора, прошедшей калибровку по опыту эксплуатации перехватывающего водозабора.

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 была разбита неравномерной прямоугольной сеткой. Для учета трансформаций свойств потока в вертикальном направлении было выделено 10 слоев.

В процессе эпигнозного моделирования рассматривался период 2002-2022 г., что позволяет воспроизвести наиболее полный массив данных мониторинга.

В ходе калибровки модели уточнялось инфильтрационное питание на участках повышенной техногенной инфильтрации между главным корпусом БЦБК и зданием ТЭЦ, а также в карте №11. В результате, диапазон вариации нормализованных среднеквадратических ошибок (НСКО), определяемых согласно выражению (2), для всех стресс-периодов составил ~10-18%. Пример сопоставления фактических и модельных уровней подземных вод приведен на рисунке 3.

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

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

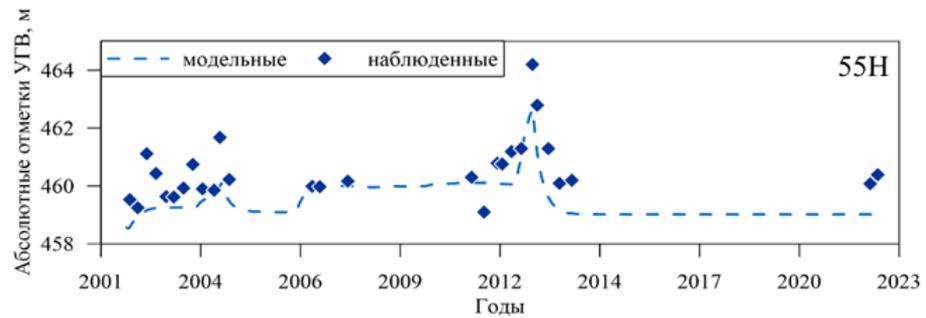


Рисунок 3. Сопоставление фактических и модельных уровней по скважине 55Н

В качестве начальных условий геомиграционных расчетов задавались экстраполированные данные гидрогеохимических исследований за 2002 год. В нижний модельный слой, а также на западной и восточной границах модели задавались фоновые значения.

Калибровка модели переноса растворенного минерального загрязнения производилась в два этапа – в первую очередь, был определен режим и интенсивность выделенных источников загрязнения для достижения НСКО менее 20%; далее производилась калибровка по параметру продольной дисперсивности. В результате, наименьшая ошибка получена при значении параметра продольной дисперсивности – 4 м.

Решение эпигнозной задачи моделирования миграции консервативного мигранта показало достаточную сходимость с массивом фактических данных (по значению минерализации), с диапазоном изменения НСКО на весь период расчетов – 12,3-15,7%. Пример сопоставления фактических и модельных значений минерализации подземных вод приведен на рисунке 4.

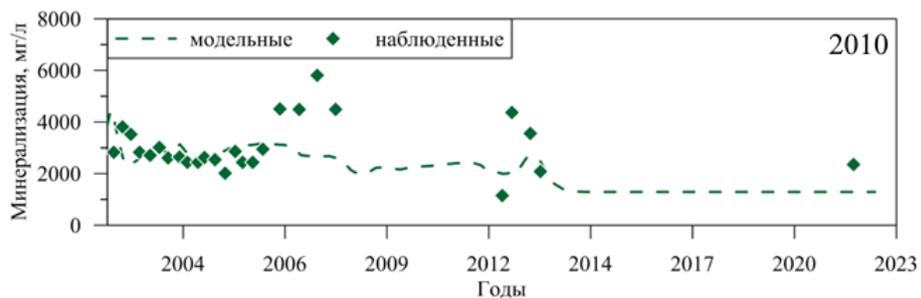


Рисунок 4. Сопоставление модельных и наблюдаемых данных по минерализации подземных вод для скважины 2010

Также были проведены прогнозные расчеты для определения распространения минерального загрязнения, реализованные в двух постановках: первая, при которой источники загрязнения остались неизменными; вторая – предусматривала извлечение источников поступления загрязнения; также каждая постановка включала два варианта – с запуском перехватывающего водозабора и без него. Результаты прогнозных расчетов приведены на рисунке 5.

Калибровка модели переноса растворенных нефтепродуктов показала большее количество источников поступления загрязнения, чем для модели переноса растворенного минерального загрязнения. Диапазон изменения НСКО на весь период эпигнозных расчетов составил 15,5-17,3%. Пример сопоставления фактических и модельных значений содержания растворенных нефтепродуктов в подземных водах приведен на рисунке 6.

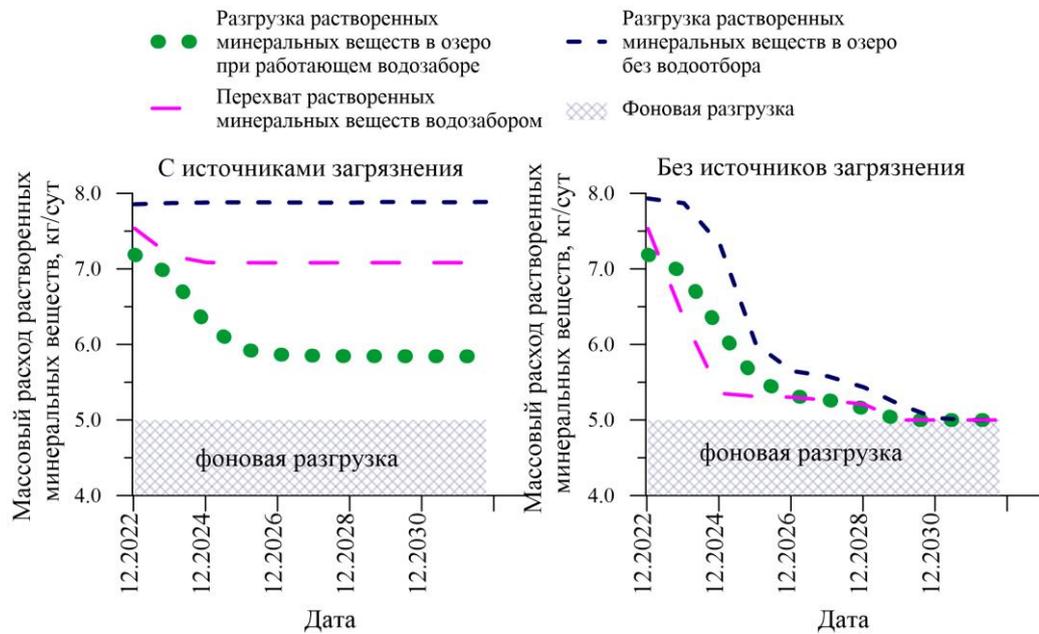


Рисунок 5. Сопоставление вариантов прогнозной разгрузки растворенных минеральных веществ

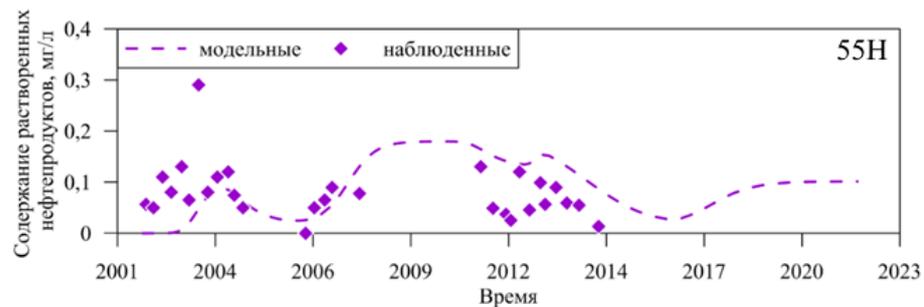


Рисунок 6. Сопоставление модельных и наблюдаемых данных по содержанию растворенных нефтепродуктов для скважины 55Н

Эпигнозные расчеты показали, что основное уменьшение количества растворенных нефтепродуктов в подземных водах территории БЦБК связано с процессами биоразложения (Рис. 7), модельная реализация которых производилось согласно минимальному из характерных значению периода полураспада – 700 суток.

Результаты прогнозных расчетов для двух вариантов реабилитации территории приведены на рисунке 8, можно отметить, что в первой постановке разгрузка растворенных нефтепродуктов через 10 лет будет выше фонового значения на порядок, как и при работающем перехватывающем водозаборе. 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.

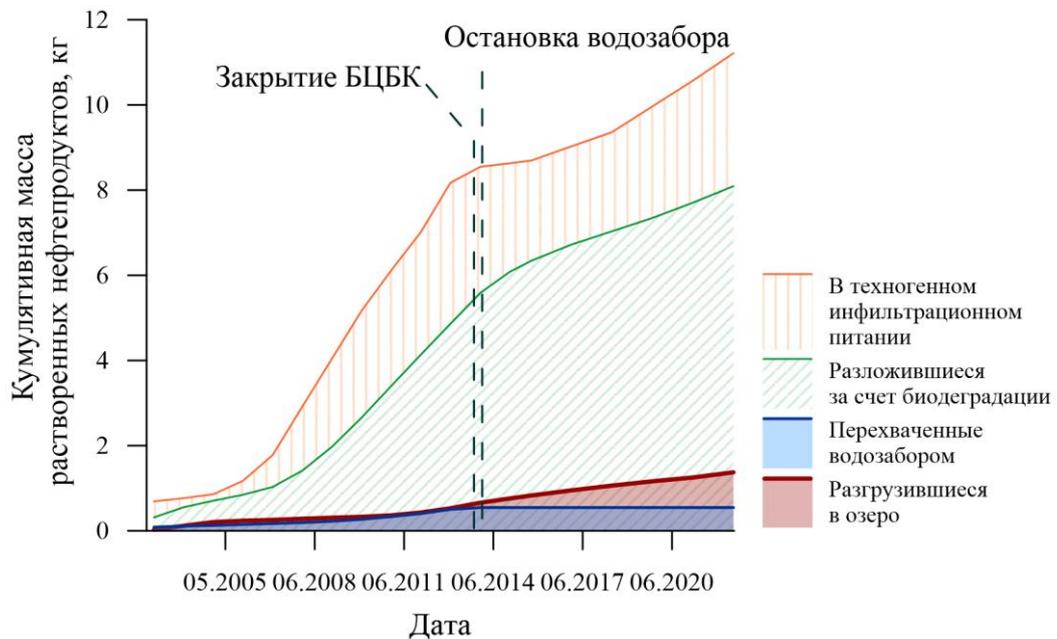


Рисунок 7. Сопоставление расчетных значений кумулятивной массы растворенных нефтепродуктов в подземных водах площадки БЦБК

Был выполнен расчет теплопереноса при адаптации параметров модели массопереноса (1), с учетом параметров теплопереноса, сформулированных в работе С.Д. Langevin²:

$$\left(\frac{\rho c}{n \rho_w c_w} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{D}_t \nabla T - \nabla \cdot (\mathbf{u} T) + \frac{q_h}{n \rho_w c_w}, \quad (3)$$

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

Калибровка эпигнозной модели теплопереноса по параметру продольной термодисперсивности, показала, 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 составило 4 м. Существенная разница обусловлена неучтенными механизмами рассеивания и поступления тепла – оттока тепла за счет кондуктивного теплообмена через кровлю моделируемой области.

Для учета оттока тепла через кровлю водоносного горизонта, исходная модель теплопереноса была модернизирована путем задания слоя постоянной температуры на верхней границе модели.

В третьей главе приводятся результаты моделирования миграции растворенного в подземных водах метана по разломной зоне дна озера Байкал.

В строении центральной впадины озера Байкал выделяется крупная структура в виде уступа, протягивающаяся от мыса Ухан до острова Ольхон (около 60 км) – разлом Гидратный, большая часть которого перекрыта маломощной (до 10 м) толщей донных отложений³. По результатам анализа содержания углеводородных газов вдоль профилей, пересекающих зону разлома, выявлено существенное превышение концентрации метана в донных отложениях, соответствующих придонному экспонированию дислоцированной зоны разлома, изотопные и молекулярные исследования полученных образцов показали наличие газов термокаталитического происхождения⁴. Результаты исследований поровых вод донных отложений, отобранных в местах разгрузки углеводородных флюидов, в ходе экспедиции Class@Bikal-2018 показали трансформацию состава поровых вод, соответствующую процессам деградации углеводородов. Так, вверх по разрезу донных отложений выявлено возрастание содержания ионов кальция, магния, стронция, калия, за исключением придонной толщи осадков, подверженной опресняющему влиянию слабоминерализованной воды озера (Рис. 10).

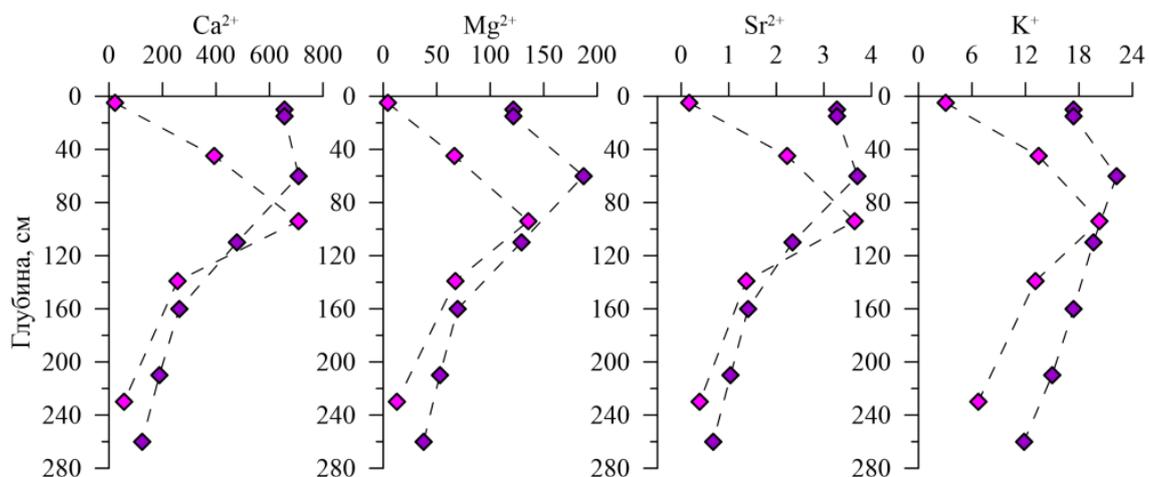


Рисунок 10. Содержание катионов (мг/л) в поровых водах донных отложений озера Байкал в двух пунктах опробования в области разгрузки углеводородов

Массоперенос в зоне разлома представляет собой перемещение растворенных компонентов с потоком подземных вод, совместно с гидродинамической дисперсией, диффузией, сорбцией, распадом (разложением) и массообменом со вмещающими породами.

³ 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.

⁴ Видищева О.Н., Ахманов Г.Г., Соловьева М.А., Маццини 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.

Схема массопереноса для таких условий представлена на рисунке 11. Миграция неконсервативного растворенного вещества, согласно схеме, определяется одномерным конвективно-дисперсионным переносом вдоль разрывного нарушения и одномерным диффузионным переносом во вмещающие породы, что может быть представлено системой дифференциальных уравнений баланса массы для разлома (4) и для вмещающих пород (5)⁵:

$$\frac{\partial c}{\partial t} - \frac{v}{n} \frac{\partial c}{\partial z} - \frac{D}{n} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + \lambda c + \frac{q}{bn} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial c'}{\partial t} - \frac{D'}{n'} \frac{\partial^2 c'}{\partial y^2} + \lambda c' = 0 \quad (5)$$

$$D = \alpha_L v + D_m$$

$$D' = \tau D_m$$

$$0 \leq z \leq \infty$$

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

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 разломе, 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; α_L – продольная дисперсивность, м; y – расстояние перпендикулярное оси трещины (разломной зоны), м; b – ширина зоны разлома, м; c' – концентрация растворенного вещества $c(y, z, t)$ в порах вмещающих пород, кг/м³; τ – коэффициент извилистости поровых каналов вмещающих пород, -; n' – коэффициент замедления во вмещающих породах, -; τ – коэффициент извилистости поровых каналов в породах заполняющих зону разлома, д.е.; D' – коэффициент диффузии во вмещающих породах, м²/сут.

Аналитическое решение системы уравнений (4-5) было ранее получено в работе⁵. Реализация аналитического расчета выполнялась при помощи специально разработанной программы на языке Python. Оценка корректности работы разработанного программного кода производилась путем воспроизведения результатов из примеров расчётов, приведенных в работе⁵.

Разработанный код позволил выполнить многовариантные расчеты для широких диапазонов параметров модели массопереноса (Рис. 12). Оценка адекватности расчетов осуществлялась путем сравнения модельных концентраций растворенного метана в разломной зоне со значениями максимальной растворимости метана при разных значениях температуры на соответствующей глубине, что является верхней границей возможного диапазона концентрации растворенного метана. Были отобраны три варианта расчетов, соответствующие профилю максимально растворимости метана по глубине разлома, для

⁵ 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. – № 3. – P. 555-564.

которых было произведено сопоставление (Рис. 13) с данными опробования верхней части донных отложений, приведенными в работе⁴.

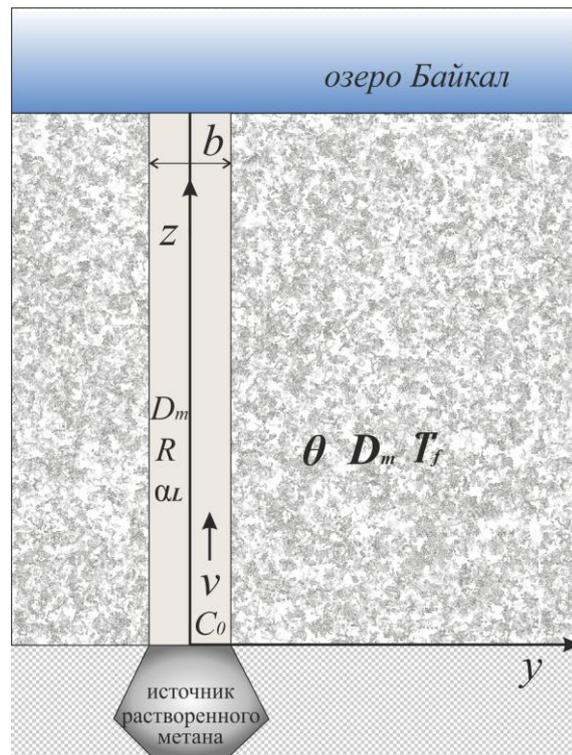


Рисунок 11. Концептуальная модель миграции в разломной зоне

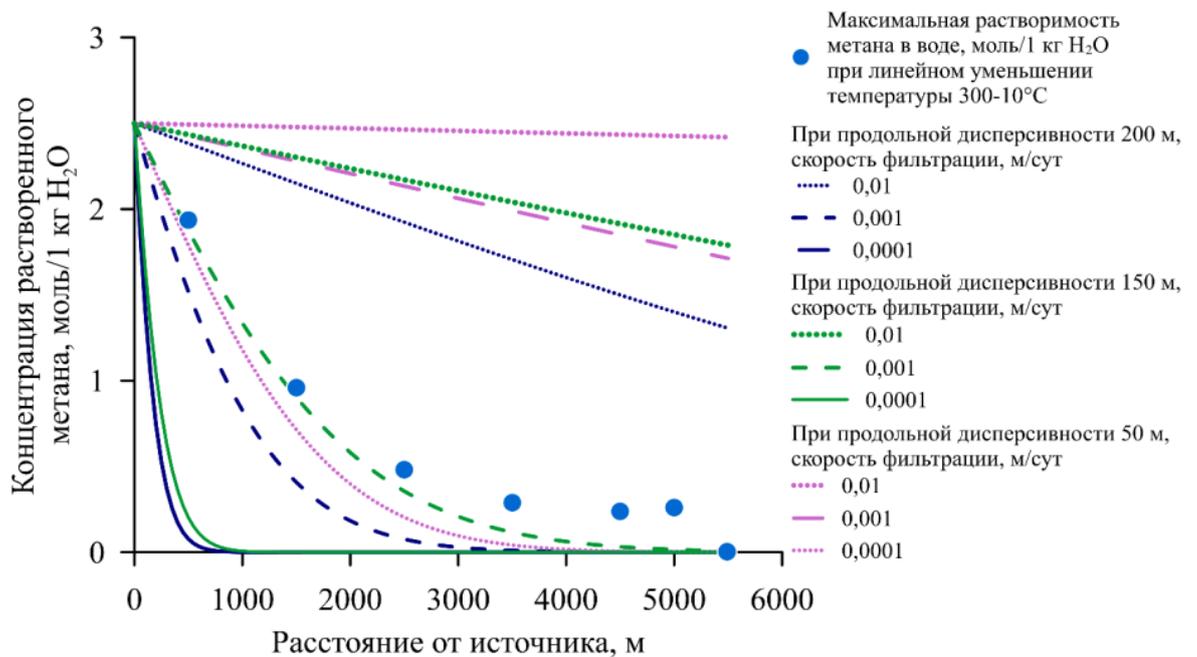


Рисунок 12. Распределение концентрации растворенного метана в разломе при концентрации в источнике 2,5 моль/1 кг H₂O, $D_m = 2,7 \times 10^{-3}$ м²/сут, $\tau = 0,1$, при различных значениях скорости фильтрации и продольной дисперсивности

В качестве еще одного критерия для оценки адекватности проведенных расчетов разгрузки растворенного метана могут быть использованы данные о его факелообразной пузырьковой разгрузке, полученные по результатам обработки гидроакустических исследований, приведенные в работе⁶. 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 и показывает закономерно меньшие значения так как учитывается только та часть метана, которая мигрирует по разлому в растворенном виде в подземных водах.

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

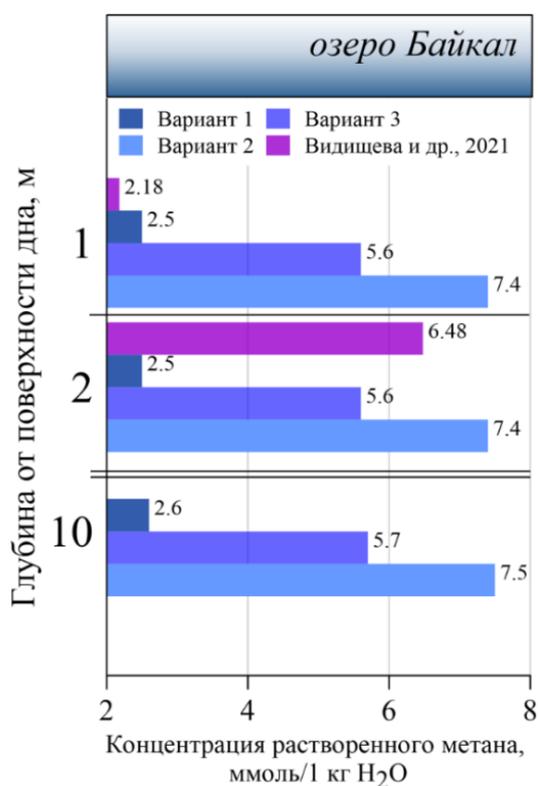


Рисунок 13. Сопоставление результатов расчетов с данными⁴ опробования верхней части донных отложений

В **заключении** приведены основные результаты диссертационного исследования, сформулированы выводы и рекомендации.

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

⁶ 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.

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 .

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

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

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, минерализации, температуре и по содержанию растворенных нефтепродуктов.

На основе калибровки модели установлено положение и режим основных источников теплового и растворенного загрязнения на территории БЦБК.

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

Эпигнозные расчеты показывают значимость вклада перехватывающего водозабора (принимал до 50 % растворенных минеральных веществ) и источников загрязнения на разгрузку растворенных минеральных веществ в Байкал. Однако основное уменьшение количества растворенных нефтепродуктов в подземных водах территории БЦБК связано с процессами биоразложения.

Прогнозные расчеты для определения распространения минерального загрязнения были реализованы в двух постановках: 1) источники загрязнения остались неизменными; 2) с извлечением источников поступления загрязнения. Также каждая постановка включала два варианта: с запуском перехватывающего водозабора и без него. Результаты расчетов показали, что в первой постановке разгрузка растворенных минеральных веществ через 10 лет будет выше фонового значения на ~35 %, а с работающим перехватывающим водозабором – на ~15 %. Расчеты по второй постановке показали, что разгрузка растворенных минеральных веществ в озеро достигнет фонового значения спустя 8 лет, при этом при функционирующем перехватывающем водозаборе – на год раньше. 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.

Проведенные прогнозные расчеты для двух вариантов реабилитации территории от нефтепродуктов показали, что разгрузка растворенных нефтепродуктов через 10 лет будет выше фоновой на порядок. Наибольший вклад в реабилитацию подземных вод территории от неконсервативного 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.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю – Расторгуеву Александру Владилиновичу за многолетний труд по руководству этой работой. 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 интересные дискуссии. Отдельную благодарность автор выражает Лехову В.А., Картунову Е.В., Кузнецову К.М., Волковой М.К. и Костериной Ю.В. за поддержку и консультации в процессе подготовки работы. Автор также весьма признателен своей семье за понимание и поддержку на протяжении работы над диссертацией.

**Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты
в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли
наук, опубликованные автором по теме диссертации**

1. **Сорокоумова Я.В.**, Расторгуев А.В., Курбонов М.Д. Оценка продольной дисперсивности при калибровке моделей тепломассопереноса в грунтовых водах на территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2024. – Т. 63. – № 4. – С. 52–60. Объем публикации 1,24 п.л., объем вклада соискателя – 80%. Импакт-фактор 0,288 (РИНЦ). EDN: EBQWPO.

Sorokoumova Y.V., Rastorguev A.V., Kurbonov M.D. Longitudinal dispersivity estimation according to heat and mass groundwater transport model calibration for the Baikalsk pulp and paper mill site // Moscow University Geology Bulletin. – 2024. – Vol. 79. – № 5. – P. 613–621. Объем публикации 1,13 п.л., объем вклада соискателя – 80%. Импакт-фактор 0,261 (SJR). EDN: KGKKFM.

2. **Сорокоумова Я.В.**, Расторгуев А.В. Моделирование миграции растворенных нефтепродуктов в грунтовых водах на территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината // Инженерная геология. – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 66–78. Объем публикации: 1,68 п.л., объем вклада соискателя – 80%. Импакт-фактор 0,385 (РИНЦ). EDN: KJTNTN.

3. 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. 65–74. Объем публикации: 1,38 п.л., объем вклада соискателя – 30%. Импакт-фактор 0,288 (РИНЦ). EDN: MFPIJF.

Kazak E.S., **Sorokoumova Y.V.**, Akhmanov G.G., Korzun A.V., Presnyakova V.M., Kazak A.V. Composition of pore solutions. A study using the indirect method of water extracts // Moscow University Geology Bulletin. – 2018. – Vol. 73. – № 5. – P. 457–466. Объем публикации: 1,22 п.л., объем вклада соискателя – 30%. Импакт-фактор 0,261 (SJR). EDN: WWEYMO.

4. 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. Объем публикации: 0,74 п.л., объем вклада соискателя – 5%. Импакт-фактор 0,288 (РИНЦ). EDN: YLFLFJ.

Akhmanov G.G., Khlystov O.M., Solovyeva M.A., Efremov V.N., Vidishcheva O.N., Mazzini A., Kudaev A.A., Bulanova I.A., Barymova A.A., Gordeev E.K., Delengov M.T., Egoshina E.D., **Sorokoumova Y.V.**, Ponimaskin P.O. Newly discovered hydrate-bearing structure in lake Baikal //

Moscow University Geology Bulletin. – 2018. – Vol. 73. – № 6. – P. 582–587. Объем публикации: 0,74 п.л., объем вклада соискателя – 5%. Импакт-фактор 0,261 (SJR). EDN: АКАОGQ.

Публикации в иных научных изданиях

5. **Сорокоумова Я.В.**, Расторгуев А.В. Оценка миграции растворенного метана в разломной зоне дна озера Байкал // Разведка и охрана недр. – 2025. – № 2 – С. 93-98. Объем публикации 0,9 п.л., объем вклада соискателя – 80%. Импакт-фактор 0,185 (РИНЦ). EDN: SBTPGY.

6. **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). Москва. 2024. – С. 169–173. Объем публикации 0,8 п.л., объем вклада соискателя – 80%. EDN: OIGTIG.