

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Лямина Лариса Андреевна

**ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ
НИЗКОЭНТАЛЬПИЙНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД В МАССИВАХ
КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОД (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ
КУЛЬДУР, ЕВРЕЙСКАЯ АВТОНОМНАЯ ОБЛАСТЬ)**

Специальность 1.6.6 – Гидрогеология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре гидрогеологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** – **Харитоновна Наталья Александровна**,
доктор геолого-минералогических наук, доцент
- Официальные оппоненты** – **Лепокурова Олеся Евгеньевна**,
доктор геолого-минералогических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Институт нефтегазовой
геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук»
(ИНГГ СО РАН), директор Томского филиала,
ведущий научный сотрудник, и.о. заведующего
лабораторией гидрогеохимии и геоэкологии
- Галицкая Ирина Васильевна**,
доктор геолого-минералогических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Институт геоэкологии имени
Е.М. Сергеева Российской академии наук» (ИГЭ
РАН), главный научный сотрудник, и.о.
заведующего лабораторией гидрогеоэкологии
- Лисёнков Александр Борисович**,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор, Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский
Государственный Геологоразведочный
Университет имени Серго Орджоникидзе»,
гидрогеологический факультет, профессор
кафедры гидрогеологии имени В.М. Швеца

Защита диссертации состоится 30 сентября 2022 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.1(МГУ.04.01) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, РФ, Москва, Ленинские горы, д. 1, главное здание МГУ, корпус «А», геологический факультет, аудитория 415.

E-mail: mgu.04.01@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/461000260/>.

Автореферат разослан 22 августа 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук,
доцент

Н.А. Харитоновна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Низкоминерализованные азотные термальные воды, формирующиеся в бассейнах трещинно-жильных вод в массивах кристаллических пород, являются уникальным объектом исследования. Уникальность данного типа терм обусловлена их низкой минерализацией (до 0,4 г/л), высокой температурой (до 100 °С), щелочной средой (рН 8-9), высокими концентрациями фтора (до 20 мг/л), кремния (до 100 мг/л H_2SiO_3), алюминия (до 10 мг/л), вольфрама и молибдена. Основной компонент газовой фазы – азот (~96–97 об.%), повышено содержание тяжелых инертных газов (Ar+Kr+Xe), которые могут составлять до 2 об.%. Подобные термы активно используются в бальнеологии и преимущественно распространены в зонах эпиплатформенного орогенеза Приморья, Забайкалья, Алтая, Саян, Тянь-Шаня, а также в раздробленных массивах кристаллических пород альпийской зоны Памира.

Азотные термы скальных массивов достаточно активно изучаются во многих регионах Земли. Много работ посвящено исследованию условий формирования их химического состава и ресурсов [Албагачиева, 1965; Барабанов, Дислер, 1968; Ломоносов, 1974; Басков, Суриков, 1989; Шварцев, 1998; Чудаев, 2003; Демонина, 2017; Шварцев, Зиппа, Борзенко, 2020; Киреева и др., 2020; Павлов и др., 2020]. Особое внимание ряд исследователей уделяли микрокомпонентному [Michard, 1990; Замана, 2000; Seeling, Bucher, 2010; Kaasalainen et al, 2015; Харитоновна и др., 2016; Чудаев и др., 2016; Шварцев, 2017; Kireeva et al., 2019; Borzenko, Zippa, 2019] и изотопному составу терм [Поляк и др., 1992; Пиннекер и др., 1995; Плюснин и др., 2013; Харитоновна и др., 2020]. Обширное количество работ посвящено исследованию формирования газового состава [Таран, 1988; Norman, Musgrave, 1994; Inguaggiato et al, 2004; Лаврушин, 2012], глубине циркуляции [Yum, 1995; Allen et al., 2006; Chiocchini et al., 2010; Зиппа и др., 2019; Bragin et al., 2021], вопросам взаимодействия терм с вмещающими породами и генезису вторичных минералов [Шварцев, 1994; Grasby et al, 2000; Замана, 2000; Kiryukhin et al, 2004; Delgado-Outeirino et al, 2009; Шварцев и др., 2015] и многим другим проблемам.

Однако, несмотря на значительное количество исследований по данной тематике, до сих пор проблемы формирования ресурсов и трансформации химического состава азотных минеральных вод остаются актуальными и дискуссионными. На сегодняшний день не полностью решен вопрос о происхождении микрокомпонентного состава азотных терм. Весьма дискуссионным является генезис газовой фазы, много вопросов возникает при оценке глубины циркуляции терм, не до конца оценены масштабы взаимодействия термальных вод с водовмещающими породами и не определен характер термодинамического равновесия в системе вода-порода-газ, а также не создано единой гидрогеологической модели циркуляции данного типа вод. Несомненно, решение вопроса об условиях формирования состава азотных термальных вод позволит понять механизм эволюции состава подземной гидросферы в целом.

Актуальность данного исследования заключается в получении фундаментальных знаний и представлений о роли новейшей геотектоники (разломной тектоники, сейсмической активности) и геоструктурного фактора в формировании химического, газового, изотопного состава, а также

энергетического баланса месторождений азотных термальных вод, распространенных в пределах массивов кристаллических пород. Исследование механизмов и путей формирования подобных месторождений является весьма актуальным в связи с огромным интересом во всем мире, проявляемым к возобновляемым источникам энергии (к которым относится геотермальная энергия), которые оказывают минимальный негативный эффект на окружающую среду. В геотермальной энергетике выделяют высокоэнтальпийные (с температурой $T > 180$ °С) и низкоэнтальпийные термы (с температурой $T < 180$ °С). Хотя низкоэнтальпийные термы не пригодны для выработки электроэнергии, спрос на низкоэнтальпийную тепловую энергию из всей мировой выработки тепловой энергии на сегодняшний день составляет 44-45 %.

Объект диссертационного исследования – низкоэнтальпийные азотные термальные лечебные воды месторождения Кульдур, располагающиеся в одноименном поселке, в отрогах хребта Малый Хинган на территории Еврейской автономной области Российской Федерации.

Кульдурское месторождение термальных вод является эталонным месторождением азотных минеральных вод в России с точки зрения геологических и гидрогеологических условий формирования. Еще в прошлом столетии был выделен особый тип минеральных вод – «Кульдурский» тип [Барабанов, Дислер, 1968].

Предметом исследования являются процессы и механизмы формирования химического, изотопного и газового состава азотных термальных вод.

Цель работы – выявление механизмов, закономерностей формирования и циркуляции низкоминерализованных азотных терм кристаллических массивов на основе комплексных исследований месторождения Кульдур, реконструирование их генезиса и построение концептуальной гидрогеологической модели эталонного месторождения на основе имеющихся фактических данных по геологии и гидрогеологии с привлечением опыта работы на месторождениях-аналогах.

В соответствии с поставленной целью главные **задачи** исследования сводятся к следующему:

- Получить новые прецизионные данные о химическом, изотопном и газовом составе термальных вод в исследуемом регионе;
- Получить новый материал по химическому и минеральному составу водовмещающих пород;
- На основании геохимических и изотопных данных определить генезис термальных вод и механизмы формирования их макро- и микрокомпонентного состава;
- Определить период водообмена изучаемых термальных вод на основе результатов исследования по содержанию в них радиоактивных (^3H , ^{14}C) и стабильных (^4He) изотопов;
- Оценить геотермический режим формирования изучаемых подземных вод;
- На основе данных об изотопном составе газовой (^{15}N , ^{13}C , ^4He) фазы, а также по содержанию благородных газов (He , Ne , Ar) и соотношению их изотопов ($^3\text{He}/^4\text{He}$,

$^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$, $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$) в исследуемых водах выявить источник основного компонента газовой фазы – азота и гелия в глубинном флюиде;

- Создать двумерную численную модель фильтрации и тепломассопереноса флюида из глубоких горизонтов земной коры к поверхности по вертикальному разрывному нарушению на основе полученных данных о водовмещающих породах, предполагаемой глубине разлома, температуре флюида и т.д.

Фактический материал. Работа выполнена на кафедре гидрогеологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. В основе научной работы лежат материалы, собранные автором и коллегами в ходе полевых исследований месторождения Кульдур в 2015, 2018-2020 гг., а также фондовые материалы [Сидоров, 1963; Кулаков, 2010] и исследования предыдущих лет [Компаниченко, 2009; Компаниченко, Потурай, 2015а; Кулаков, 2011]. Для обоснования защищаемых положений был выполнен комплекс химических и изотопных опробований жидкой и газовой компоненты термальных вод месторождения, проведены исследования химического и минерального состава водовмещающих пород, представленных гранитами и гранодиоритами.

Личный вклад автора. Автор непосредственно принимала участие на всех этапах исследования, включая полевые (маршруты, сбор образцов водовмещающих пород, отбор проб термальных и поверхностных вод, первичный анализ и обработка материалов) и лабораторные работы (пробоподготовка, исследования пород на микрозонде и томографе, а также описание шлифов). Кроме этого, автор выполнял сбор фактического материала, обработку, анализ и интерпретацию результатов исследований, а также разрабатывал серию моделей формирования азотных терм в кристаллических массивах. Обработка данных осуществлялась с помощью следующих программных комплексов: средств Microsoft Office, Corel Draw, QGIS Desktop, MapInfo, Surfer, Geochemist's Workbench, GW_Chart, Visual MINTEQ, WinSelektor, FEFLOW.

Методология и методы исследования. В основу диссертационной работы заложен стандартный алгоритм действий, применяемый в геологии: сбор фактического материала, отражающего исследования предыдущих лет – полевые работы на месторождении, включая маршрутные исследования с отбором проб – лабораторные исследования – анализ результатов – вывод общих закономерностей.

Полевые работы проводились в период с 2015 по 2020 гг. В ходе полевых и маршрутных исследований были отобраны пробы из термальных скважин, реки Кульдур и атмосферных осадков, а также произведен отбор образцов водовмещающих пород в районе исследования.

Образцы твердокаменного материала были проанализированы: 1) методом атомно-эмиссионной спектрометрии; 2) методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС), а также были подвергнуты 3) рентгеноспектральному микроанализу и 4) микротомографическому анализу. Обработка полученных лабораторных данных проводилась согласно установленным правилам в рамках направления «геохимия».

Для проб поверхностных и термальных вод был выполнен комплекс лабораторных исследований: 1) определение химического состава – методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС), методом ионной хроматографии, а также титриметрическим методом; 2) содержание органического углерода производилось методом ИК-детектирования (на анализаторе ТОС-V); 3) исследование изотопного состава: стабильные изотопы – методом масс-спектрометрии, радиоактивные – методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS).

Научная новизна.

- Проведено комплексное аналитическое исследование химического, газового и изотопного состава азотных термальных вод месторождения Кульдур.
- Впервые проведены комплексные исследования водовмещающих пород второй фазы тырмо-буреинского комплекса ($\gamma\delta_2C_{2-3t}$).
- Впервые получены данные об изотопном составе благородных газов, изотопных соотношений $^3He/^4He$, $^4He/^{20}Ne$, $^{20}Ne/^{22}Ne$, концентрациях гелия в газовой фазе. Выполнен анализ изотопного состава главного компонента газовой фазы – азота, с определением содержания изотопа $\delta^{15}N$.
- Определены глубинные температуры формирования термальных вод на месторождении Кульдур.
- Впервые на основании результатов расчета геотермометров и изотопных исследований разработана гидрогеологическая 2D-схема фильтрации и массопереноса высокотемпературного флюида по вертикальному разлому из глубинных горизонтов земной коры к поверхности для термального месторождения Кульдур.
- Разработана концептуальная модель формирования азотных термальных вод в гранитных массивах, отражающая особенности циркуляции флюида в глубоких горизонтах земной коры.

Теоретическая значимость. Теоретическая значимость работы обусловлена комплексным подходом к решению фундаментальных проблем гидрогеохимии – вопросов генезиса и эволюции азотных термальных вод кристаллических массивов, связанных с районами молодых тектонических разломов на территории области развития интрузивных пород. Используемые методы и методики исследования позволили выявить источник водной, газовой и солевой компонент изучаемых термальных вод, оценить температуру глубинного флюида на месторождении и создать двумерную численную модель фильтрации глубинного водного флюида к поверхности земной коры на основе фактических данных. Рассматриваемые теоретические проблемы решаются в рамках общей теории взаимодействия вода-порода, которая в настоящее время активно развивается многими исследователями.

Практическая значимость. Азотные термы являются важным типом минеральных вод, поэтому практическая значимость работы заключается в возможности использования результатов исследования термальных вод Кульдурского месторождения для других сложных

гидрогеологических объектов подобного типа. Установление генезиса и процессов, контролирующих химический, изотопный и газовый состав минеральных вод, необходимо при разработке рациональной схемы их использования.

Исследование гидрогеологических особенностей условий и механизмов формирования азотных терм в кристаллических массивах позволит реально оценить перспективы использования и развития не только ресурсной базы курортного комплекса Кульдур, но и Дальневосточного региона в целом. Это позволит определить основные перспективные направления санаторно-курортного лечения и строительства.

Проведенный комплекс научных работ позволяет более эффективно вести поиски и разведку месторождений термальных вод, производить оценку запасов, применять метод аналогии для объектов-аналогов с целью экономии средств при геологоразведочных работах.

Обоснованность и достоверность результатов исследований. Обоснованность и достоверность результатов научных исследований, положений и выводов основывается на: 1) использовании стандартных методик, применяемых в гидрогеологии и гидрогеохимии для обработки и анализа материала, полученного в ходе полевых и лабораторных исследований; 2) значительном объеме полученных данных и их соответствии с результатами, полученными другими авторами в данных областях исследований; 3) использовании при лабораторных исследованиях современного высокоточного оборудования, проходящего ежегодные метрологические поверки в сертифицированных лабораториях для анализа воды, газа и каменного материала; 4) апробацией основных научных положений на различных конференциях и публикацией в рецензируемых журналах.

Апробация работы и публикации. Результаты проведенных исследований, основные положения и проблемы, рассматриваемые в диссертации, изложены в 19 публикациях, в том числе в 3 публикациях в рецензируемых научных изданиях, определенных п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова.

Результаты исследований были представлены на научных конференциях: XXII Симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П. Виноградова (Москва, ГЕОХИ РАН, Россия, 29-31 октября 2019); Международная конференция Goldschmidt 2019 (Барселона, Испания, 18-24 августа 2019), Международная конференция Goldschmidt 2020; IV Всероссийская конференция с международным участием имени профессора С.Л. Шварцева «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами» (Улан-Удэ, Россия, 17-20 августа 2020); Всероссийская научная конференция с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2020–2021) (Петропавловск-Камчатский, Россия, 3-8 сентября 2020 и 2021); Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2021» (МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 12-23 апреля 2021) и «Ломоносов-2020» (МГУ имени М.В. Ломоносова,

Россия, 10-27 ноября 2020); 29 Всероссийская молодежная конференция "Строение литосферы и геодинамика" (Иркутск, Россия, 11-16 мая 2021); XXIII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока (Иркутск, Россия 21–26 июня, 2021).

Объем и структура. Объем работы – 162 страницы, включая 17 таблиц, 71 иллюстрацию. Работа состоит из введения, восьми глав, заключения. Список литературы содержит 214 наименований.

Финансовая поддержка полевых работ и лабораторных исследований по теме диссертации осуществлялась за счет грантов Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-05-00445\18) и Российского научного фонда (проект № 18-17-00245).

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю – д.г.-м.н., профессору кафедры гидрогеологии МГУ имени М.В. Ломоносова Наталье Александровне Харитоновой за наставничество, неиссякаемый научный интерес, всестороннюю поддержку и помощь в решении вопросов, рассматриваемых в работе, а также безграничное терпение на всех этапах исследования и подготовки научной работы. Автор также признателен за бесценный опыт, советы и рекомендации к.т.н. доценту кафедры гидрогеологии МГУ имени М.В. Ломоносова Александру Владилиновичу Расторгуеву.

Автор благодарен д.г.-м.н. заместителю директора по научной работе ГИН РАН Василию Юрьевичу Лаврушину за ценные научные советы и многочасовые дискуссии. Автор искренне благодарит к.г.-м.н. руководителя лаборатории геохимии гипергенных процессов ДВГИ ДВО РАН Ивана Валерьевича Брагина и к.г.-м.н. сотрудника лаборатории тепломассопереноса ГИН РАН Георгия Алексеевича Челнокова за непосредственное участие и помощь в проведении полевых работ.

Неоценимую помощь в проведении геохимических исследований оказал в.н.с. руководитель лаборатории рентгеновских методов ДВГИ ДВО РАН Александр Александрович Карабцов. Отдельную благодарность в проведении многочасовых геохимических исследований и теплое отношение автор выражает вед. технологу лаборатории рентгеновских методов ДВГИ ДВО РАН Наталье Ивановне Екимовой и вед. инженеру Марии Александровне Ушковой.

Огромная признательность выражается всем сотрудникам кафедры гидрогеологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова за ценные комментарии, научные дискуссии и дружескую поддержку на всем протяжении исследования.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

Защищаемое положение 1. *Низкоэнталийные азотные термы Кульдурского месторождения приурочены к области молодых тектонических движений, сопряженных с зонами разломов в изверженных кристаллических породах. По данным проведенного изотопного анализа $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ доказываемая, что термальные воды месторождения имеют атмосферное, инфильтрационное происхождение. Область питания располагается на южных отрогах хр. Малый Хинган; область разгрузки приурочена к самому низкому участку долины реки Кульдур,*

сопряженного с узлом пересечения Меридионального и оперяющего разломов. Формирование химического состава азотных терм начинается с момента проникновения метеогенных вод из зоны выветривания по разломам до глубины 4–5 км, где они нагреваются до температур 130–140 °С. Установлено, что маломинерализованные щелочные $\text{HCO}_3\text{-Na}$ термы с повышенными содержаниями F, Si, Al, Mo и других микрокомпонентов формируются в результате выщелачивания гранитов при повышенных температурах.

Месторождение Кульдур располагается на северо-западе ЕАО в Российской Федерации. Район исследования характеризуется сглаженными волнистыми формами рельефа. Преобладающие высоты Малого Хингана – 500–700 м над уровнем моря. Климат региона континентальный умеренный муссонный. Среднегодовая температура в ЕАО колеблется в пределах от –3 °С до +2 °С. По количеству осадков район относится к зоне достаточного увлажнения (600–800 мм). Наибольшее количество (более 800 мм) осадков выпадает в предгорных районах. Основной гидрографической артерией месторождения является река Кульдур, берущая свое начало на южных склонах хребта Малого Хингана.

Геологическое строение региона достаточно сложное. Территория исследования расположена в юго-западной части Мало-Хинганского блока Восточно-Буреинского выступа фундамента Буреинского срединного массива, который имеет гетерогенное строение. Кульдурское месторождение азотных термальных вод расположено на территории Пионерского гранитного массива, площадью в 400 км². Пионерский массив слагают породы в основном второй фазы тырмо-буреинского комплекса ($\gamma\delta_2\text{C}_{2-3t}$) совместно с породами первой и четвертой фазы [Добкин, 1999]. Район исследования входит в область активной сейсмической деятельности. Это область постоянно обновляющихся тектонических нарушений.

В ходе гидрогеологического районирования установлено [Гидрогеология СССР, 1971], что азотные термы Кульдурского месторождения располагается в южной части Хинганского слабо расчлененного гидрогеологического массива, входящего в Амуро-Охотскую гидрогеологическую складчатую область. Кульдурские термы, как и термы многих других провинций термальных вод областей молодых тектонических разломов, связаны с крупной зоной тектонического дробления в гранитном массиве. Кульдурское месторождение приурочено к узлу пересечения Меридионального разлома и оперяющего его нарушения круто (70-85°) падающего на северо-восток. Естественные выходы азотных терм наблюдаются на Термальной площадке, размером 150x150 м, вдоль долины реки Кульдур, где термальные воды выходят в различных местах из-под аллювия в виде небольших ключей.

Исследуемые термальные воды являются метеорными, что подтверждается результатами анализов изотопного состава терм. Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ для азотных терм находятся в диапазоне от -13,2 до -14,6 ‰ и от -100,6 до -105,1 ‰; для реки значения варьируют в незначительном диапазоне от -13,0 до -13,3 ‰ и от -91,6 до -95,8 ‰; для атмосферных осадков значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ -12,0 ‰ и -89,5 ‰ соответственно [Харитонова и др., 2020] (Рисунок 1).

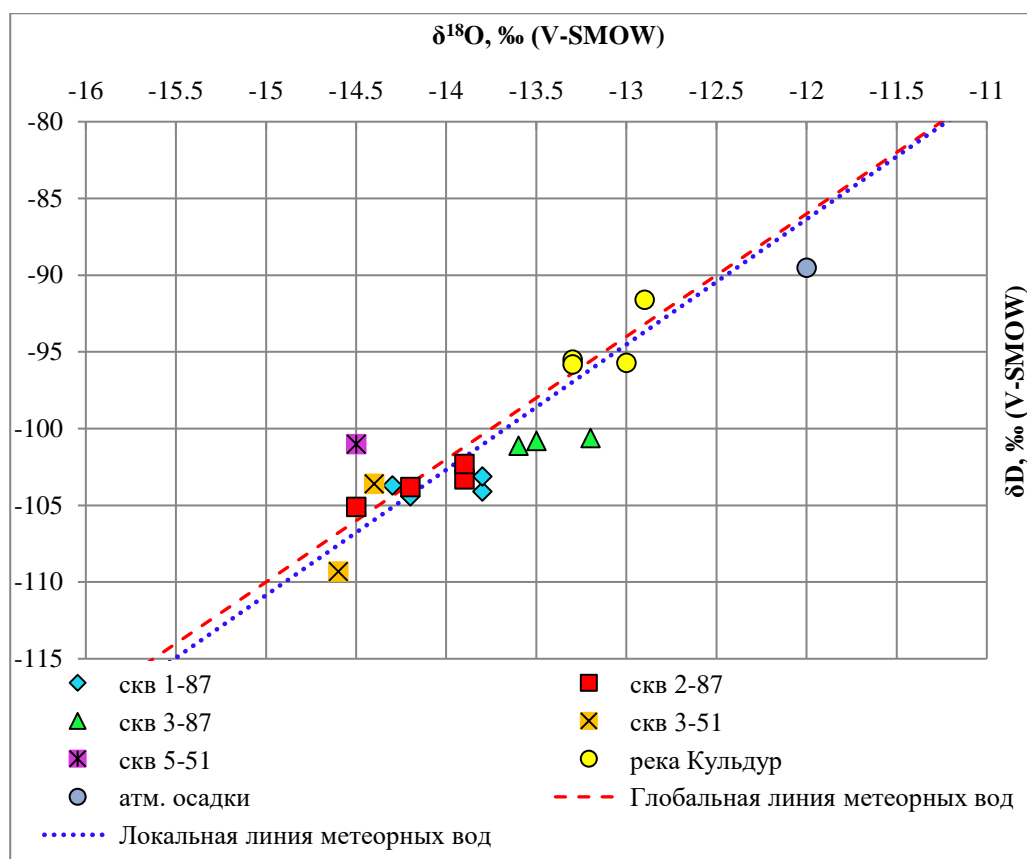


Рисунок 1. Бинарная диаграмма распределения стабильных изотопов $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ для термальных вод месторождения Кульдур

Утяжеление изотопного состава кислорода может свидетельствовать о достаточно длительном времени взаимодействия термальных вод с алюмосиликатными минералами горных пород, для которых характерны высокие значения $\delta^{18}\text{O}$. Растворяя алюмосиликаты, воды обогащаются изотопами кислорода, что обеспечивает значительное отклонение фигуративных точек терм от местной линии метеорных вод.

Область питания азотных термальных вод, согласно изотопным соотношениям $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, находится на высотных отметках 800–1000 м [Bowen et. al., 2005; Bowen et. al., 2010]. Ближайшая наивысшая точка располагается в 2–2,5 км юго-восточнее от месторождения – сопка Партизанская (800 м). Наивысшая точка в данном районе находится ~10 км северо-западнее от месторождения на южных склонах хребта Малый Хинган с высотными отметками 1042 м.

Согласно результатам исследования, полученным с помощью геотермометров, холодные метеорные воды проникают по ослабленным зонам области питания – трещинам и разломам до глубин 4–5 км и нагреваются до температур 130–140 °С.

Термальные воды месторождения Кульдур, как и многие термы, относящиеся к «кульдурскому типу», характеризуются небольшими значениями минерализации, которые не превышают 0,3–0,4 г/л и восстановительными обстановками формирования (Eh от -141 до -375 мВ) при максимальной температуре на выходе 72 °С. Химический облик азотных терм Кульдура формируется в процессе гидролитического разложения силикатов (Na, K, Ca-полевых шпатов) при

высоких температурах. В таких условиях ионы Na и K гидратируясь образуют сильные щелочи, смещая pH раствора в область щелочных значений (pH до 9,5). При этом растворимость солей натрия растет с температурой в отличие от кальция, что определяет гидрокарбонатно-натриевый состав термальных вод (Таблица 1). Содержание Na^+ достаточно высокое и колеблется в диапазоне от 78,1 до 94,3 мг/л. Концентрации K^+ не превышают 2,7 мг/л, содержание иона Ca^{2+} максимально доходит до 2,1 мг/л. Магний среди катионов занимает подчиненное значение и его концентрации составляют менее 0,2 мг/л.

Таблица 1. Химический состав термальных вод месторождения Кульдур

Скважина	1-87		2-87		3-87		3-51		5-51
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	-
pH	8,0	8,9	8,8	9,1	7,8	9	8,9	9,2	9,5
Eh (мВ)	-243	-296	-299	-375	-285	-290	-141	-250	-149
T (°C)	72		72		64		53		28
TDS	264,6	339,2	266,2	331,4	272,6	332,3	267,4	335,1	331
SO_4^{2-}	11,2	16,6	15,7	19,3	14,4	19,5	17,8	18,4	18,5
Cl^-	22,2	32,7	30,5	35,7	24,5	35,1	31,7	32,4	31,8
NO_3^-	<0,1	0,3	0,1	0,5	<0,1	0,8	<0,1	0,1	0,1
Ca^{2+}	0,9	1,8	1,4	1,9	1,7	2,1	1,6	1,7	1,8
Mg^{2+}	0,1		<0,1	0,1	<0,1		<0,1	0,2	0,1
Na^+	78,1	89,1	80,6	88,6	83,1	94,3	78,9	89,5	89
K^+	1,9	2,2	1,9	2,2	2,2	2,7	1,9	2,4	1,9
SiO_2	71,5	111,2	71,7	111,2	66,2	93,0	69,0	112,1	109,7
F^-	13,5	19,1	17,1	20,6	15,3	19,8	17,9	19,1	17,7
HCO_3^-	12,7	45,9	10,7	25,5	12,9	43,6	13,2	25,6	24,8
CO_3^-	30,4	48,2	26,1	36,8	31,5	45,8	32,2	36,9	35,7

Среди анионов наиболее распространены ионы HCO_3^- и CO_3^- , что связано с процессом растворения углекислого газа CO_2 с образованием гидрокарбоната HCO_3^- (по реакции $\text{OH}^- + \text{CO}_2 = \text{HCO}_3^-$). Диапазон концентраций HCO_3^- и CO_3^- изменяется от 10,7 до 45,9 мг/л для HCO_3^- и от 26,1 до 48,1 мг/л для CO_3^- соответственно. На втором месте – Cl^- , содержание которого может доходить до 35,7 мг/л. Концентрации SO_4^{2-} максимально составляют 19,5 мг/л. Содержание нитрат иона незначительное, менее 0,8 мг/л.

Воды обогащены кремнием (от 66,2 до 100 мг/л SiO_2) – одним из главных бальнеологических компонентов, по которому данные воды относятся к лечебным минеральным.

Азотные термы месторождения Кульдур имеют высокие концентрации F^- (с максимальным содержанием до 20,6 мг/л), что связано с составом водовмещающих пород и гидрогеологическими условиями циркуляции вод [Лаврушин, 2012]. При исследовании геохимического и минералогического состава водовмещающих пород Пионерского массива были выявлены основные фтор содержащие минералы: фторсодержащие силикаты, а именно слюды (например, биотит, мусковит) и фосфаты ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$).

Кульдурские термы обогащены алюминием (≥ 10 мг/л), вольфрамом, молибденом и рядом других аниогенных элементов. Концентрация истинно растворенных форм РЗЭ в исследуемых термальных водах низкая и колеблется в достаточно широких пределах – от 0,039 до 0,0001 мкг/л. Во всех пробах преобладают ЛРЗЭ (около 86,3%), затем следуют ТРЗЭ (не более 17,4%) и СРЗЭ (до 7%). В целом общая низкая концентрация РЗЭ в рассматриваемых термальных водах типична для низкоминерализованных вод кристаллических массивов [Чудаев и др., 2016; Демонина и др., 2019].

Таким образом, метеорные воды, попадая из зоны питания по трещинам и разломам, проникают до глубин 4–5 км и нагреваются до 130-140 °С. При этом метеорные воды на всем пути миграции непрерывно взаимодействуют с алюмосиликатами – гранитами и гранодиоритами второй фазы тырмо-буреинского комплекса ($\gamma\delta_2C_2$ -zt), приобретая свойственные азотным термам особенности химического, изотопного и газового состава.

Защищаемое положение 2. *Основной компонент газовой фазы термальных вод месторождения Кульдур – азот (N_2) имеет атмосферно-коровый генезис, что подтверждается значениями $\delta^{15}N$. Присутствие кислорода в водах обусловлено захватом газа из трещин при движении воды в гидротермальной системе. Исходя из результатов изотопии $\delta^{13}C$ и $\delta^{14}C$ установлено, что CO_2 захватывается термальными водами в зоне разгрузки, непосредственно контролирует образование HCO_3^- и имеет биогенный генезис. По изотопным соотношениям $^3He/^4He$, $^4He/^{20}Ne$, $^{20}Ne/^{22}Ne$ доказано, что гелий – преимущественно радиогенно-коровый, примесь мантийного гелия очень незначительна и не превышает 3%.*

Особенность гидрогеологической структуры [Крайнов, 2012] определяет не только условия формирования химического состава термальных вод, но и влияет на состав газовой фазы. В газовом составе рассматриваемых Кульдурских термальных вод преобладает азот (до 98 %). Примеси других газов (CH_4 , CO_2 , O_2), как правило, незначительны. Присутствие кислорода в водах можно объяснить не ошибкой при отборе проб, а захватом газа из трещин при движении воды в гидротермальной системе. Установлено наличие в термальных водах инертных газов (Ar, Kr, Xe, Ne и He) в значительной концентрации ($\geq 1,9$ об.%). В целом полученные нами значения близки опубликованным данным, что свидетельствует о постоянстве газовой фазы в течение, как минимум, шестидесятилетнего периода (Таблица 2).

Таблица 2. Химический и изотопный состав попутного газа (об.%) термальных вод

Номер пробы	CO ₂	N ₂	CH ₄	O ₂	He	Ar	N ₂ /Ar	Ar/N ₂ *100	Ar*100/ N ₂ *1,18	$\delta^{15}N$	Вид газа
	об.%								‰		
Kul-59*		97,66	0,3		0,15	1,89	51,67	1,94	2,28		раств.
Kul-60**	-	97,59	0,5	-	0,18	1,73	56,4	1,77	1,5	-	своб.
Kul-19	0,01	97,42	0,34	0,09	0,17	1,81	53,8	1,86	1,58	0,1	своб.
Kul-20	0,1	97,52	0,4	0,01	0,16	1,66	58,6	1,71	1,45	0,9	своб.

*по данным Фондовых материалов, **по данным из книги «Азотные термы СССР» [Барabanов, Дислер, 1968]

Согласно общепринятому соотношению N_2/Ar , которое для воздуха (air) составляет 84, а для грунтовых вод (asw) – 38–40, в водах месторождения Кульдур данное соотношение находится в диапазоне от 53,8 до 58,6, свидетельствуя об атмосферном происхождении азота. На классификационную диаграмму $N_2/100-10He-Ar$ были нанесены составы газовой фазы азотных термальных вод из разных регионов Земного шара для сравнения и выявления зависимостей формирования газовой компоненты (Рисунок 2). На представленной диаграмме наглядно отображено, что месторождение Кульдур и месторождения-аналоги азотных кремнистых терм из разных регионов находятся в области глубокой циркуляции метеорной компоненты газовой фазы. Таким образом, пробы спонтанного газа месторождений азотных терм указывают на присутствие в пробах как атмосферной, так и коровой компоненты в разных пропорциях.

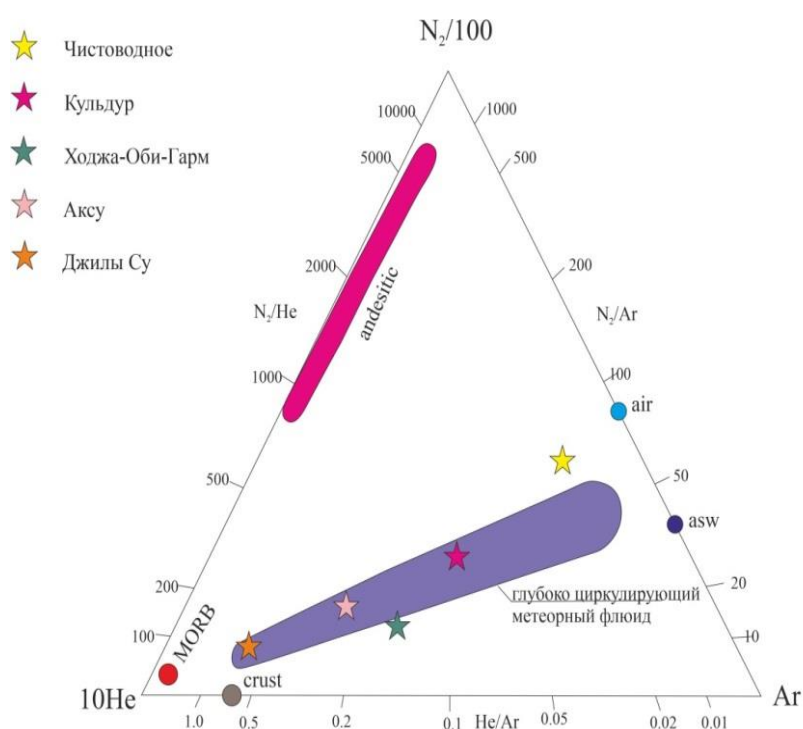


Рисунок 2. Классификационная диаграмма $N_2/100-10He-Ar$ для определения генезиса газовой фазы азотных термальных вод из разных регионов. Следующие поля и точки взяты из работ [Giggenbach, 1986; Norman, 1994]: air – воздух, asw – насыщенная воздухом грунтовая вода, MORB – базальтовая мантия, crust – кора, andesitic – субдуцированный андезит

Данное предположение подтверждается значением $\delta^{15}N$, используемым в геологии для определения генезиса азота (Таблица 2). Соотношение компоненты азота из воздуха (f_a), мантии (f_m) и субдуцированных отложений (f_s) было оценено на основе значений $\delta^{15}N$ и соотношений N_2/He [Sano et al., 1998, 2001; Fisher et al., 2002] в соответствии со следующими уравнениями:

$$(\delta^{15}N)_{\text{means}} = f_a \cdot (\delta^{15}N)_a + f_m \cdot (\delta^{15}N)_m + f_s \cdot (\delta^{15}N)_s \quad (1)$$

$$1/(N_2/He)_{\text{means}} = f_a \cdot 1/(N_2/He)_a + f_m \cdot 1/(N_2/He)_m + f_s \cdot 1/(N_2/He)_s \quad (2)$$

$$1 = f_a + f_s + f_m, \quad (3)$$

где $(\delta^{15}\text{N})_m = -5\%$ по сравнению с воздухом; $(\delta^{15}\text{N})_s = +7\%$ по сравнению с воздухом; $(\delta^{15}\text{N})_a = 0\%$ по сравнению с воздухом; $(\text{N}_2/\text{He})_m = 150 \pm 30$; $(\text{N}_2/\text{He})_s = 1,05 \times 10^4$; $(\text{N}_2/\text{He})_a = 1,49 \times 10^5$ [Marty, Zimmermann, 1999; Elkins et al., 2006].

Проведенные расчеты показывают, что на месторождении Кульдур воздушная компонента азота изучаемых терм превалирует (54%), далее следует коровая компонента (40%) и незначительную часть составляет мантийная (не более 6 %).

Углекислый газ в термальных водах месторождения Кульдур имеет подчиненное значение. Среднее содержание CO_2 в спонтанном газе исследуемых терм достигает не более 0,01-0,1 (об. %). Высокая щелочность термальных вод ($\text{pH} > 9$) обуславливает незначительное содержание свободного CO_2 в спонтанном газе и отсутствие в растворенной форме. Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ составляют $-19,6 \div -25,6\%$, что указывает на биохимическое происхождение углекислого газа.

Изотопный состав гелия (${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$) является исключительно чувствительным индикатором поступления мантийного вещества в верхние горизонты литосферы [Morikawa N., 2008]. Полученные значения ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}_{\text{изм.}}$ для термальных вод месторождения Кульдур низкие, варьируют от $4,12 \cdot 10^{-7}$ для вод центрального участка до $2,86 \cdot 10^{-7}$ в водах промежуточной зоны. Соотношения ${}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$ сильно различаются в водах разных участков: в водах центральной зоны значения ниже, чем в водах промежуточной зоны (Таблица 3).

Расчет соотношения атмосферного, корового и мантийного гелия был выполнен по методике Сано и Вакита [Sano, 1985] (Рисунок 3):

$$({}^3\text{He}/{}^4\text{He}) = ({}^3\text{He}/{}^4\text{He})_a \cdot A + ({}^3\text{He}/{}^4\text{He})_m \cdot M + ({}^3\text{He}/{}^4\text{He})_c \cdot C, (4)$$

$$1/({}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne}) = A/({}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne})_a + M/({}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne})_m + C/({}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne})_c, (5)$$

$$A + M + C = 1, (6)$$

где A, M, C – это атмосферная, мантийная и коровая компонента (в %) гелия He; $({}^3\text{He}/{}^4\text{He})_a = 1,4 \cdot 10^{-6}$; $({}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne})_a = 0,318$; $({}^3\text{He}/{}^4\text{He})_m = 1,1 \cdot 10^{-5}$; $({}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne})_m = 1000$; $({}^3\text{He}/{}^4\text{He})_c = 1,5 \cdot 10^{-8}$; $({}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne})_c = 1000$ [Sano, 1985].

Таблица 3. Изотопные характеристики инертных газов, ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ и ${}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$ отношения в азотных термальных водах месторождения Кульдур

Проба	2-87	3-87
${}^3\text{He}$	$1,9 \cdot 10^{-12}$	$4,8 \cdot 10^{-13}$
${}^4\text{He}$	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$
${}^{20}\text{Ne}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$
${}^{36}\text{Ar}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$7,2 \cdot 10^{-7}$
${}^{84}\text{Kr}$	$6,2 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
${}^{132}\text{Xe}$	$3,2 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$
${}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$	4,24	11,78
${}^3\text{He}/{}^4\text{He}_{\text{изм.}}$	4,12	2,86
${}^3\text{He}/{}^4\text{He}_{\text{исп.}}$	3,37	2,57

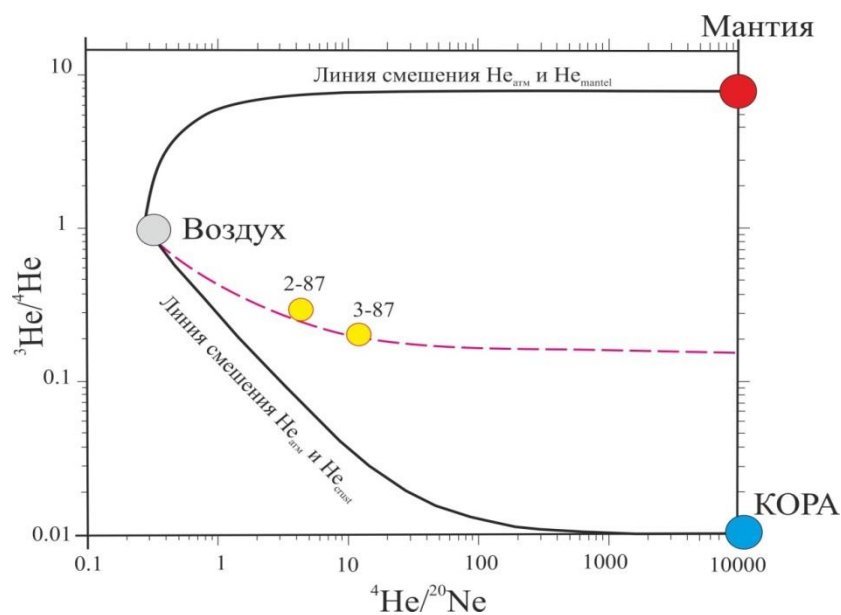


Рисунок 3. Диаграмма, характеризующая природу изотопов гелия на месторождении Кульдур

Результаты расчетов показывают, что количество корового гелия в водах месторождения Кульдур несколько варьирует: в водах центральной зоны: $He_{кор}$ составляет $\sim 90\%$, в то время как в промежуточной зоне – 95% . Количество мантийного гелия ($He_{ман}$) приблизительно одинаково в обеих зонах и составляет $2,1\text{--}2,6\%$, а атмосферного гелия ($He_{атм}$) больше в центральной зоне ($\sim 7,4\%$) и меньше в промежуточной ($2,6\%$).

Защищаемое положение 3. *Разработана и верифицирована по данным изотопных и гидрогеохимических исследований концептуальная модель водообмена и теплопереноса в структуре Кульдурского месторождения термальных вод. С использованием этой модели выявлена решающая роль разрывного нарушения, глубины его заложения и проницаемости блоков трещиноватого коллектора в формировании геотемпературного поля на участке исследования. Выявлено уникальное сочетание этих параметров, которое привело к формированию термальных ресурсов месторождения. Модельный период водообмена подземных вод в зоне курорта сопоставим с результатами, полученными по изотопным определениям.*

В ходе проведенных исследований была построена концептуальная гидрогеологическая модель формирования термальных вод в кристаллических породах на примере месторождения Кульдур в программном комплексе FEFLOW. Для обобщенного структурирования, применяя данные геофизических, гидрогеологических и геологических исследований, были выделены три основных блока модели, соответствующие зоне экзогенной трещиноватости, зоне разрывного нарушения и массиву скальных пород. Все три зоны различаются по фильтрационным свойствам (Рисунок 4).

Размеры 2D модели в данной постановке задачи определялись расположением областей питания для месторождения и глубиной формирования термальных вод, рассчитанной по геотермометрам. Протяженность модели составляет 11806 м, мощность – 6800 м. На рисунке 5 приведена дискретизация расчетного разреза на 1846 элементов с 1001 узлами. В зоне

повышенной трещиноватости 240 узлов и 196 элементов, в зоне разлома 46 узлов и 20 элементов, 715 узлов и 1630 элементов в массиве скальных пород. Типы элементов представлены треугольной формой. Средний размер элемента составляет 350×300×400 м. Неортогональная дискретизация позволяет учесть зону разрывного нарушения, ширина которой 10-15 м. Поэтому вблизи зоны разгрузки была выполнена более детальная разбивка модели.

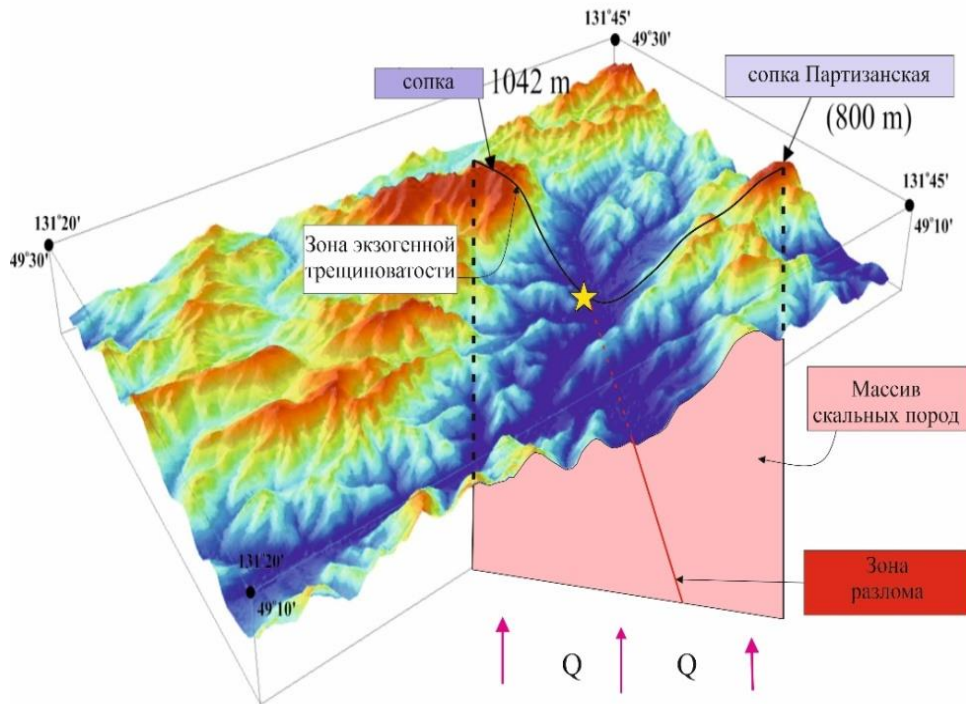


Рисунок 4. Схема концептуальной модели Кульдурского месторождения (Q – тепловой поток, [МВт/м²])

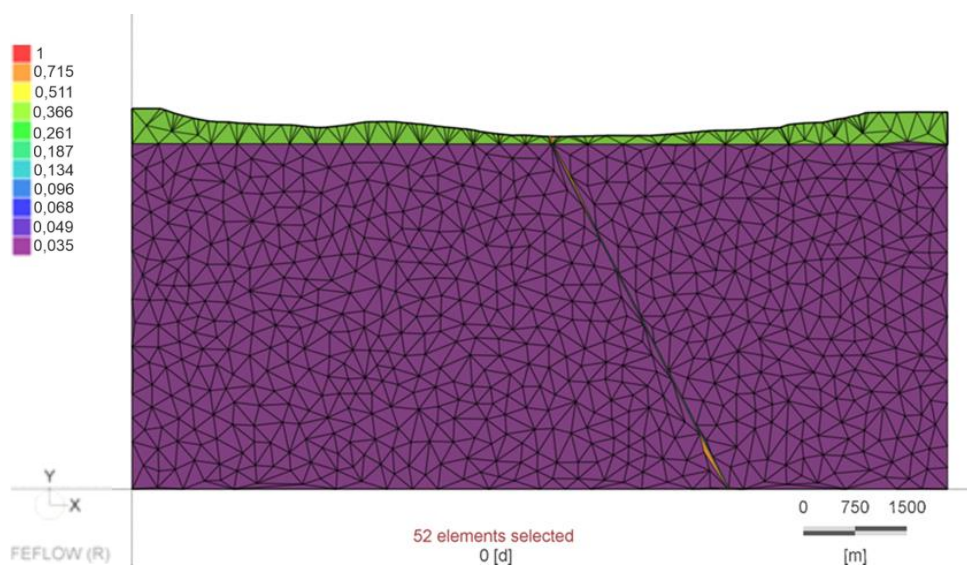


Рисунок 5. Дискретизация расчетной области

Исходными данными модели выступают коэффициенты фильтрации, взятые из литературных источников, которые дают представление о значениях коэффициентов фильтрации в схожих гидрогеологических условиях (Таблица 4) [Magri,2016; Malkovsky, Magri, 2016; Альтовский, 1962].

Таблица 4. Физические свойства моделируемых областей

Описание	Блок	Коэффициент фильтрации К (м/сут)	Теплопроводность λ	Пористость п
Верхняя зона повышенной трещиноватости	1	$3,5 \cdot 10^{-1}$	2,1	0,05
Зона разлома	2	20–0,001	1,1	0,1
Скальные породы	3	$3,5 \cdot 10^{-2}$ – $3,5 \cdot 10^{-5}$	2,4	0,02

На верхней границе области моделирования задавалось инфильтрационное питание, граничное условие (ГУ) второго рода. Средняя величина инфильтрационного питания для проведения расчетов принята равной $W = 0,00037$ м/сут. По дну долины реки Кульдур задано ГУ первого рода с постоянным напором $H = \text{const} = 366$ м. На нижней и боковых границах задано ГУ второго рода, они являются непроницаемыми.

На верхней границе задана постоянная температура 0°C , соответствующая среднегодовой температуре для поселка Кульдур. В узлах, где происходит разгрузка термальных вод, не задается граничное условие теплопередачи, что позволяет флюиду разгружаться с расчетной температурой. На нижней границе задавалась постоянный тепловой поток 65 мВт/м². Боковые границы термически изолированы, поскольку нет потока жидкости через границу и нет существенной разницы температур с обеих сторон модели. Температура может изменяться в зависимости от конвективного теплообмена через граничное условие Коши.

Источником питания термальных вод месторождения Кульдур являются атмосферные осадки, что подтверждается изотопией кислорода и водорода. Разгрузка термальных вод происходит в р. Кульдур и через разломную зону термальной площадки.

На первых этапах исследования было установлено, что фильтрационные параметры слабопроницаемого массива скальных пород напрямую влияют на период циркуляции термальных вод, что вполне естественно. При уменьшении коэффициентов фильтрации от $3,5 \times 10^{-2}$ до $3,5 \times 10^{-5}$ м/сут происходит изменение диапазона возраста на несколько порядков: от 1 369 до 601 009 лет в зоне разгрузки. Также при увеличении коэффициента фильтрации изменяется характер распределения температурного поля – происходит формирование 2-х конвективных ячеек в массиве водовмещающих пород. При минимальных коэффициентах фильтрации (10^{-4} – 10^{-5} м/сут)

отмечается равномерное распределение температур с глубиной с учетом геотермического градиента для данной территории. Так как на первом этапе моделирования рассматривается однородный по вертикали разрез, то есть структура без сложной геометрии или контрастных теплофизических свойств, то в данной постановке должно получиться нормальное распределение температур с увеличением по глубине. Так при среднем геотермическом градиенте для данного района в 26-27 °С/км средняя температура на глубине 6–6,8 км должна быть в районе 156–180 °С. Используя результаты гелиевой методики датирования «возраста» подземных вод (62 342–172 756 лет для скважины 2-87 и 53 651–154 246 лет для скважины 3-87) и оценки геотермического режима территории исследования, был установлен приемлемый коэффициент фильтрации (10^{-4} м/сут) для слабопроницаемых скальных пород Пионерского массива на месторождении Кульдур.

Предыдущие исследования зарубежных и отечественных коллег по данной тематике показали, что температурный режим области разгрузки термальных вод регулируется не столько гидродинамическими свойствами водовмещающих пород или аномальными значениями теплового потока на месторождении, сколько фильтрационными свойствами разломной зоны, глубиной заложения разлома и его конфигурацией [Zhenjiao, 2018]. Поэтому следующим этапом моделирования было установлено вероятное распределение коэффициента фильтрации разломной зоны и глубина ее заложения. В данной постановке моделирования рассматривались, однородная и неоднородная зоны разлома, а также разные глубины заложения дизъюнктивного нарушения: не более 2 км, 4-4,5 км и соответственно 6,8 км.

В ходе решения поставленной задачи были получены следующие результаты для однородной зоны разлома с глубиной заложения 6,8 км: во-первых, схема с учетом разломной зоны показывает, что разрывное нарушение способствует подъему «более древних» вод к земной поверхности; во-вторых, характер распределения напоров и структуру потока при увеличении коэффициента фильтрации регулирует в большей мере зона разлома, а не разница напоров (Рисунок 6); в-третьих, температура на нижней границе модели увеличивается, что связано с подтягиванием флюида с более глубоких горизонтов земной коры; в-четвертых, общий возраст термальных вод при увеличении коэффициента фильтрации снизился в несколько раз.

При заложении однородной схемы разрывного нарушения с коэффициентами фильтрации от 1 до 10 м/сут и глубиной до 6,8 км температура выхода термальных вод максимально достигала всего 10-15 °С вместо 72-73 °С. Полученные результаты не соответствовали реальной картине температурного поля области разгрузки, поэтому было принято решение охарактеризовать разломную зону по коэффициенту фильтрации с учетом теоретических данных распределения фильтрационных свойств с глубиной [Ingebritsen, 2010]. Для проверки данного предположения была также выбрана модель с разломной зоной, проходящей через весь массив скальных пород до глубины 6,8 км.

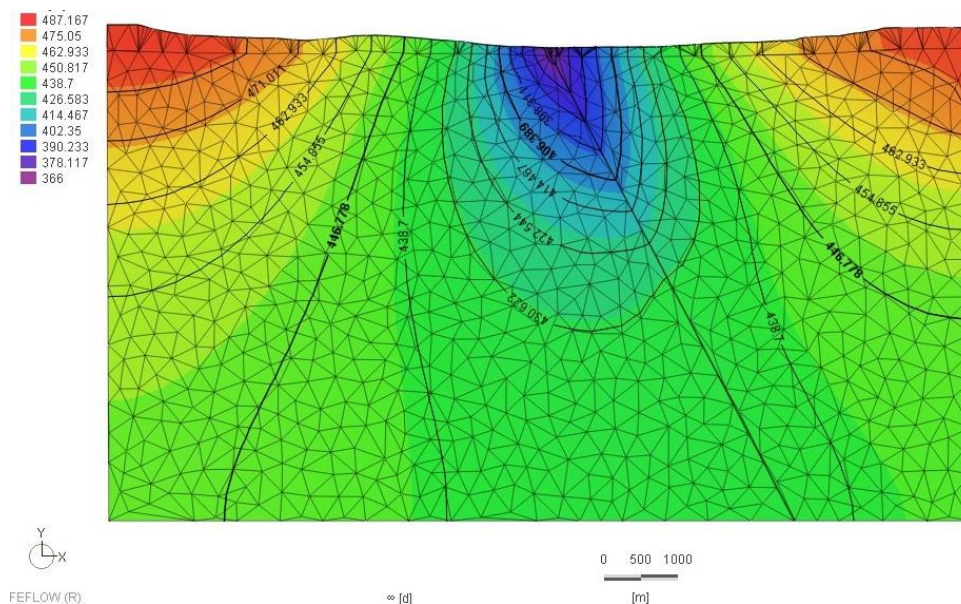


Рисунок 6. Характер распределения напоров (Н, м) при однородной зоне разлома с коэффициентом фильтрации 0,1 м/сут

Коэффициент фильтрации на всем протяжении разломной зоны изменяется от 20 м/сут в зоне экзогенной терциноватости до 0,01 м/сут. По результатам проведенной калибровки удалось добиться следующих результатов: во-первых, температура разгрузки составила больше ~ 80 °С, а фактическая температура терм на месторождении не превышает 70–72 °С; во-вторых, температура на нижней границе модели составила 238 °С. Такие температуры на глубине 6–6,8 км не связаны с большим значением теплового потока q мВт/м², аномальными значениями вертикального температурного градиента, или анизотропностью теплофизических свойств исследуемых пород.

Полученное распределение температур обусловлено подъемом термальных вод через разломную зону, которая, по сути, является проводником флюида с большей температурой, создавая тем самым значительную разницу температур и образуя две достаточно большие конвекционные ячейки; в-третьих, диапазон по времени при неоднородной разломной зоне составил от 18 529 до 250 828 лет. К зоне разгрузки подходят термальные воды с возрастом от 13 689 до 54 758 лет. Полученные значения возраста вкладываются в диапазон по времени, который был получен по данным ⁴He (~ 50 -170 тыс. лет).

Основной целью следующего этапа работ была проверка предположения о влиянии глубины заложения разломной зоны на температуру разгрузки. Так как при глубине заложения разлома в 6,8 км температура выхода составила более 80 °С, то дополнительно были рассмотрены 2 модели с разной глубиной заложения разлома: в первом варианте глубина не более 2 км, а во втором не более 4,5 км. Характер распределения коэффициента фильтрации по разломной зоне был аналогичен модели с разломной зоной, проходящей по всему разрезу.

По результатам проведенного моделирования удалось установить, что характер распределения температур в модели с глубиной заложения разлома в 2 км аналогичен модели без учета разлома. Температура на нижней границе модели с разломом составляет 179 °С, в то время как на модели без разлома 170 °С. Небольшие возмущения прослеживаются только по изотерме в 20 °С, в остальном можно отметить нормальное распределение температур в разрезе. Температура на выходе в зоне разгрузки не превышает 10-11 °С. Диапазон по времени, с учетом неоднородной зоны разлома неглубокого заложения, увеличился, примерно, в 2,5 раза по сравнению с моделью «сквозного» разлома и составляет 56 026–624 048 лет. Средний возраст термальных вод, подходящих к зоне разгрузки (при решении в стационарном режиме) составляет не более 27 379 лет.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что дизъюнктивное нарушение глубиной заложения в 2 км и меньше не формирует конвективную ячейку, способствующую миграции более высокотемпературного флюида из нижних частей земной коры к поверхности.

Далее была рассмотрена вторая модель Кульдурского месторождения термальных вод, которая строилась исходя из возможного расположения разлома на глубинах, соответствующих глубинам формирования азотных терм, рассчитанным по данным геотермометров – от 4,8 км до 5,1 км. Средняя глубина заложения разлома составляет 4,5 км – немного меньше, чем значения, полученные по геотермометрам. В рассматриваемой модели диапазон по возрасту составляет 31 798–366 997 лет соответственно. В зоне разгрузки возраст термальных вод может иметь некоторый разброс: от 27 379 лет до 82 137 лет (Рисунок 7). Температура на нижней границе модели составляет 220 °С, что больше на 41 °С модели с разломом в 2 км и меньше всего на 18 °С модели с глубиной заложения в 6,8 км.

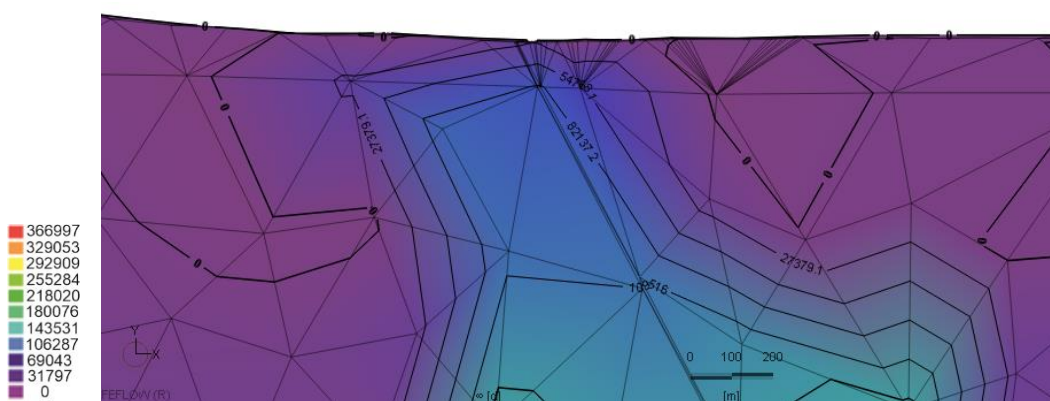


Рисунок 7. Диапазон значений возраста термальных вод в зоне разгрузки

В разрезе выделяются две конвективные ячейки, четко оконтуренные до глубин, примерно, 5,3–5,5 км. Данные значения совпадают с глубинами формирования азотных терм, рассчитанные с помощью Na-K геотермометра. Также следует обратить внимание, что температура в зоне разгрузки соответствует натурным данным. Исходя из исторических фактов разведки месторождения, необходимо сказать, что до 1927 года, то есть до бурения 100 метровых скважин,

на месторождении средняя температура выходов на Термальной площадке составляла 30–50 °С. Позже, скважинами была вскрыта жила термальных вод с температурами в 70–72 °С.

Таким образом, по результатам проведенного численного моделирования удалось выявить решающую роль разрывного нарушения, его глубины заложения и коэффициента фильтрации блоков трещиноватого коллектора в формировании геотемпературного поля на участке исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На северо-западе ЕАО в зонах проявления глубинных разломов в Пионерском массиве гранитов формируются азотные термальные воды. Месторождение Кульдур, как и большинство термопроявлений, непосредственно связано с разломной зоной – Меридиональным разломом, который протягивается вдоль долины реки Кульдур. Установлено, что в районе исследования развиты слабоминерализованные (300-400 мг/л) щелочные азотные термы, по химическому составу – $\text{HCO}_3\text{-Na}$, с высокими концентрациями SiO_2 , F, Mo, W, Al. На месторождении присутствует температурная зональность: максимальные температуры 71–73 °С в центральной зоне и 55–64 °С в промежуточной зоне, 25 °С на периферии. Каких либо отличительных особенностей в формировании химического состава термальных вод по выделенным зонам не выявлено, что подтверждает единые условия формирования.

В составе газовой фазы преобладает N_2 (более 95–98 %), остальные компоненты, например, He, Ne, Ar, CO_2 представлены как сопутствующие и не превышают от общего объема более 3–5 %. Изотопные исследования газового состава позволили более подробно рассмотреть условия формирования азотных терм в кристаллических массивах. Так, анализируя полученные значения $\delta^{13}\text{C}$ в газовой фазе термальных вод, был установлен источник CO_2 , связанный с органическим веществом. Значения $\delta^{15}\text{N}$ позволили установить атмосферно-коровый генезис основного компонента газовой фазы в термальных водах месторождения Кульдур. Основным источником поступления гелия в термальные воды месторождения Кульдур являются реакции радиоактивного распада элементов U-Th ряда в гранитах (90% гелия имеет коровый генезис).

По происхождению термальные воды являются метеорными. Положение областей питания подземных вод приурочено к отрогам хр. Малого Хингана на высоте (абс. отметки над уровнем моря) 800–1100 м. Азотные термальные воды формируются в условиях низкими значениями теплового потока (~60–65 мВт/м²) при температурах 130–140 °С на глубине 4-5 км. Высокие температуры разгрузки термальных вод, достигающие до 72 °С, в условиях отсутствия аномальных значений теплового потока Q, обусловлены уникальным для данного месторождения сочетанием фильтрационных параметров кристаллического массива и дизъюнктивного нарушения, а также глубиной заложения разлома. Температура азотных терм в области разгрузки непосредственно зависит от фильтрационных параметров и глубины заложения разломной зоны, которая на месторождении не превышает 4,5 км. Коэффициент фильтрации слабopоницаемого массива, совместно с выводящей зоной разлома, контролируют характер циркуляции термальных вод,

обуславливают время и пути миграции этих вод на земную поверхность. Возраст термальных вод по данным моделирования в зоне разгрузки составляет от 27 379 до 82 137 лет, что хорошо коррелируется с результатами датирования по изотопу ^4He (53 651–172 756 лет).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова

1. Харитоновна Н.А., **Лямина Л.А.**, Челноков Г.А., Брагин И.В., Карабцов А.А., Тарасенко И.А., Накамура Х., Ивамори Х. Химический и изотопный состав азотных термальных вод месторождения Кульдур (ЕАО, Россия) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2020. – №5. – С. 77-91. Импакт-фактор в РИНЦ (2020): 0,759. Объем публикации 1,1 п.л., объем вклада соискателя 0,7 п.л.
2. Челноков Г.А., Харитоновна Н.А., Брагин И.В., Асеева А.В., Бушкарева К.Ю., **Лямина Л.А.** Геохимия редкоземельных элементов в водах и вторичных минеральных отложениях термальных источников Камчатки // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2020. – №1. – С. 88-96. Импакт-фактор в РИНЦ (2020): 0,759. Объем публикации 0,8 п.л., объем вклада соискателя 0,3 п.л.
3. **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. Импакт-фактор в РИНЦ (2020): 0,759. Объем публикации 1 п.л., объем вклада соискателя 0,8 п.л.

Статьи и тезисы докладов в сборниках трудов конференций

4. Харитоновна Н.А., **Лямина Л.А.**, Челноков Г.А., Брагин И.В., Корзун А.В., Чебыкин Е.П. Изотопы Н, О и U в низкоэнталийных термальных водах месторождения Кульдур (Еврейская АО, Россия) // XXII Симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П. Виноградова. – Москва: ГЕОХИ РАН. – 2019. – С.455-460.
5. **Лямина Л.А.** Гидрогеохимические условия формирования азотных термальных вод на примере месторождения Кульдур (Еврейская автономная область) // Проблемы геологии и освоения недр. – Томск: ТГУ. – 2019. – С.423-425.
6. **Lyamina L.A.**, Kharitonova N.A., Chelnokov G.A., Chebikin E.P., Nakamura H., Iwamori H., Morikawa N., Bragin I.V. Chemical and isotopic signatures of the thermal groundwaters from Kuldur Spa (Russia) // Goldschmidt Conference Abstracts 2019. – Barcelona, Spain. – 2019. – №. 2093.
7. **Лямина Л.А.**, Харитоновна Н.А., Брагин И.В., Челноков Г.А. Гидрогеохимические условия формирования азотных термальных вод на примере месторождения Кульдур (Еврейская автономная область) // статья в сборнике Геология на окраине континента: Материалы I молодежной научной конференции-школы. – Владивосток: Изд-во Дальневосточного федерального университета. – 2019. – С.125-128. Режим доступа – http://yconf.fegi.ru/images/material_yconf2019.pdf.
8. **Lyamina L.A.**, Kharitonova N.A., Karabtsov A.A. Chemical and Mineralogical Composition of Water-Bearing Materials of the Kuldur Geothermal Reservoir (Jewish Autonomous Region) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – V. 459(4). – P.1-7.

9. **Лямина Л.А.** Особенности формирования низкоминерализованных азотных термальных вод на примере месторождения Кульдур // *Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2020»*. Секция «Геология». – М.: МАКС Пресс, 2021. Режим доступа – https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2020/data/19272/104518_uid267724_report.pdf.
10. **Лямина Л.А.** Особенности изотопного состава низкоэнталийных термальных вод месторождения Кульдур // *Проблемы геологии и освоения недр*. – Томск: ТГУ. – 2020. – Т.1. – С.369-370.
11. **Лямина Л.А.**, Расторгуев А.В., Штенгелов Р.С., Харитонов Н.А. Гидродинамическая модель формирования азотных термальных вод в кристаллических массивах на примере месторождения Кульдур // *Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2020)*. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. – 2020. – С.44-47. Режим доступа – <http://www.kscnet.ru/ivs/conferences/GeothermVolc2020/PROCEEDINGS-2020.pdf>.
12. **Лямина Л.А.**, Харитонов Н.А., Расторгуев А.В., Брагин И.В., Карабцов А.А., Челноков Г.А. Гидрогеологические особенности формирования азотных термальных вод на примере месторождения Кульдур // *Материалы четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием*. – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН. – 2020. – С.72-75.
13. Харитонов Н.А., Челноков Г.А., Брагин И.В., **Лямина Л.А.**, Корзун А.В., Муромец Н.Н., Накамура Х., Ивамори Х. Геохимия и механизмы формирования низкоминерализованных термальных вод в массивах кристаллических пород // *Материалы четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием*. – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН. – 2020. – С.53-56.
14. **Lyamina L.**, Kharitonova N., Chelnokov G., Bragin I., Nakamura H., Iwamori H., Morikawa N., Chebikin E. New data on isotopic signature of the thermal groundwaters from Kuldur spa (Russia) // *Goldschmidt Conference Abstracts 2020*. – 2020. Режим доступа – <https://goldschmidtabstracts.info/abstracts/abstractView?id=2020004176>.
15. **Лямина Л.А.** Изотопы гелия в подземных флюидах Камчатки // *Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2021»*. Секция «Геология». – М.: МАКС Пресс, 2021. Режим доступа – https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2021/data/22053/131402_uid267724_report.pdf.
16. **Лямина Л.А.**, Айдаркожина А.С., Челноков Г.А. Оценка температур базиса циркуляции термальных вод кристаллических массивов // *статья в сборнике Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXIX Всероссийской молодежной конференции*. – Иркутск: ИЗК СО РАН. – 2021. – С.161-163. Режим доступа – <http://lsg.crust.ru/images/upload/articles84/154.pdf>.
17. **Лямина Л.А.**, Харитонов Н.А., Расторгуев А.В., Челноков Г.А., Брагин И.В. Генезис и эволюция низкоэнталийных азотных терм в гранитных массивах на примере месторождения Кульдур // *статья в сборнике Подземная гидросфера: Материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием*. – Иркутск: ИЗК СО РАН. – 2021. – С.198-202. Режим доступа – <http://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/ПодземГидросф2021.pdf>.
18. Харитонов Н.А., Челноков Г.А., Брагин И.В., Асеева А.В., **Лямина Л.А.**, Барановская Е.И., Корзун А.В., Накамура Х., Ивамори Х. Геохимия минеральных вод восточной окраины Евразии: циркуляция флюида в зоне субдукции и за ее пределами // *статья в сборнике Подземная гидросфера: Материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием*. – Иркутск: ИЗК СО РАН. – 2021. – С.240-244. Режим доступа – <http://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/ПодземГидросф2021.pdf>.

19. **Лямина Л.А.**, Харитонов Н.А. Изотопы гелия в источниках Камчатки // статья в сборнике Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа (Geothermal Volcanology Workshop 20210): Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. – 2021. – С.131-134. Режим доступа – <http://www.kscnet.ru/ivs/conferences/GeothermVolc2021/PROCEEDINGS-2021.pdf>.