

На правах рукописи

АЛЕКСЕЕВА ЛЮДМИЛА ПАВЛОВНА

**ГЕОХИМИЯ ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДОВ, СОЛЁНЫХ ВОД И
РАССОЛОВ ЗАПАДНОЙ ЯКУТИИ**

25.00.07 - гидрогеология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Томск-2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук

Научный консультант: доктор геолого-минералогических наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР, заслуженный деятель науки РФ **Шварцев Степан Львович**

Официальные оппоненты:

Матусевич Владимир Михайлович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Тюменский государственный нефтегазовый университет», профессор кафедры геологии месторождений нефти и газа

Плюснин Алексей Максимович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Сибирского отделения РАН, зам. директора

Рыженко Борис Николаевич, доктор химических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, заведующий лабораторией моделирования гидрохимических и гидротермальных процессов

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мерзлотоведения им П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск

Защита диссертации состоится 27 апреля 2016 г. в 14-00 ч. на заседании объединенного диссертационного совета ДМ 212.269.03 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, корпус 20, аудитория 504.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/2799/worklist>.

Автореферат разослан «...»..... 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.г.-м.н.



Лепокурова Олеся Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Активная разработка и эксплуатация месторождений алмазов, нефти, газа в Западной Якутии в сложных физико-географических, геологических, геокриологических и гидрогеологических условиях требует всестороннего знания о геологическом пространстве и в целом о природной среде региона. Западная Якутия находится в области самого глубокого на Земле многолетнего промерзания горных пород - мощность криолитозоны достигает 1450 м. Подземные льды, формирующиеся на больших глубинах в горных породах, влияют на основные закономерности строения мёрзлых толщ, структурно-текстурные черты горных пород, особенности локализации подземных вод, их геохимию, гидродинамику, генезис и формирование, взаимосвязи и взаимодействие с вмещающими горными породами, а физико-химическое состояние подземных льдов зеркально отображает сущность процессов преобразования состава подземных вод в криотермических условиях. Изучение гидрогеохимических особенностей этих льдов позволит в итоге восстановить палеогидрогеологическую обстановку в период формирования многолетнемерзлых пород. Водообменные системы криолитозоны включает в себя элементы – горные породы, воду в различных фазовых состояниях, газ, органическое вещество – длительное взаимодействие которых приводит к эволюционному изменению криогидрогеологических систем. Комплексное изучение их составляющих даёт ключ не только к пониманию процессов формирования, развития и преобразования подземной гидросферы при её глубоком охлаждении, что составляет фундаментальную проблему, но и к научному прогнозу, востребованному в практической области.

Крайне важным звеном эволюции системы вода-порода является генезис и особенности формирования рассолов хлоридного состава. Однако до настоящего времени полной ясности в решении этих проблем нет. Особенно проблематично происхождение подземных хлоридных соленых вод и рассолов, насыщающих осадочные терригенно-карбонатные толщи и магматические горные породы. Выявление ведущих процессов формирования ионного и изотопного состава рассолов, установление источников и причин накопления в них макро- и микрокомпонентов, а также особенностей их распределения в рассолах разных типов, требуют скорейшего решения.

Подземные солёные воды и рассолы региона, заполняющие геологический разрез, характеризуются максимальной концентрацией ряда микрокомпонентов (брома, лития, стронция, рубидия и др.) и представляют собой самостоятельную промышленную ценность как гидроминеральное сырьё. Всё это определяет исключительный интерес и актуальность изучения геохимических особенностей подземных текстурообразующих льдов и подземных солёных вод и рассолов Западной Якутии.

Цель работы. Выявление геохимических особенностей подземных льдов, подземных хлоридных солёных вод и рассолов, обоснование их генезиса и оценка высокоминерализованных подземных вод как гидроминерального сырья.

Основные задачи:

- изучить подземные текстурообразующие льды региона как неотъемлемую составляющую системы вода-порода, особенности формирования их макро- и микрокомпонентного состава;

- выявить закономерности распространения, гидрогеологической зональности и гидрогеохимические особенности хлоридных солёных вод и рассолов в осадочных толщах и интрузивных породах Западной Якутии;

- на основе численного моделирования оценить степень равновесия подземных вод с минералами вмещающих пород и выявить ведущие факторы формирования состава подземных соленых вод и рассолов;

- изучить распределение стабильных изотопов (^2H , ^{18}O , ^{37}Cl и ^{81}Br , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) в подземных водах хлоридного состава и выявить достоверные изотопные генетические признаки этих вод;

- исследовать закономерности распределения некоторых ценных компонентов (брома, лития, рубидия, стронция) в рассолах Западной Якутии и обосновать перспективность сырьевой базы для использования гидроминерального сырья (жидкой поликомпонентной руды).

Объектами научного исследования являются подземные льды, подземные солёные воды и рассолы, насыщающие геологический разрез в пределах алмазоносных районов Западной Якутии; процессы формирования состава, генезис и эволюция этих объектов представляют *предмет исследования*.

Фактический материал и личный вклад автора. В диссертации изложены результаты многолетних (1993-2014 гг.) теоретических и прикладных исследований, выполненных лично автором, либо при его непосредственном участии в государственных научных программах (3.1.12.1. «Формирование и геологическая деятельность подземных вод Востока СССР», 4.1.01. «Исследование условий формирования подземных вод и их роли в геологических процессах», 5.1.2., 5.1.3. «Ресурсы, динамика и охрана подземных вод», 28.6. «Экогеохимия природных и техногенных ландшафтов Сибири, гидрогеологический и гидрогеохимический мониторинг», 1.05.03. «Сибирь», ГНТП 1.9.1. «Глобальные изменения природной среды и климата»), междисциплинарных научных проектах СО РАН № 74, 78, 99, 101, междисциплинарном интеграционном проекте «Литий России», ежегодных экспедиционных проектах СО РАН, а также международных проектах PICS-2650 «Mécanismes et balans d'altération en climats froids: étude du système hydrologique du Baïkal» и NSFC «Геохимия хлора и брома в подземных водах Китая и России».

Разработка фундаментальной научной проблемы осуществлялась при финансовой поддержке РФФИ (гранты 94-05-26877; 97-05-74592; 01-05-64012; 04-05-64426; 04-05-22000-НЦНИ, 06-05-03038; 08-05-00086; 13-05-01075; 14-05-91155-ГФЕН).

Систематизация обширного фактического гидрогеологического и геокриологического материала, накопленного за долгие годы работы на территории криолитозоны, позволила создать банк гидрогеохимических данных Западной Якутии, включающий около 2000 анализов проб текстурообразующих льдов, пресных, солёных вод и рассолов. В рамках комплексных научных исследований автор выполняла обработку и интерпретацию многолетних режимных наблюдений в пределах кимберлитовых полей Западной Якутии, непосредственно осуществляла физико-химическое моделирование процессов, происходящих в системе вода-порода, направленное на решение проблемы формирования химического состава подземных вод в естественных и нарушенных

условиях в пределах криолитозоны, проводила количественную оценку содержания ценных компонентов в рассолах как гидроминеральном сырье. Исследование изотопного состава подземных вод региона осуществлялось при сотрудничестве с французскими коллегами из Страсбургского университета, канадскими учеными из Университета Ватерлоо и китайскими исследователями из Китайского университета Геонаук.

Методы исследования. Диссертационное исследование основано на материалах собственных полевых работ, результатах изучения режима подземных вод и мёрзлых пород, обобщенных данных разведочных работ ОАО АК «АЛРОСА» в пределах кимберлитовых полей, глубокого опорного бурения, а также обширной геологической, гидрогеологической и геохимической опубликованной и фондовой литературе, касающейся Западной Якутии.

В своих исследованиях автор придерживался основополагающего методологического принципа единства природных вод, принципов эволюционного преобразования подземной гидросферы, заложенных Е.В. Пиннекером, а также известных подходов комплексного анализа природных систем на основе современных методов гидрогеологии, гидрогеохимии, геокриологии и физико-химического моделирования.

Специфика объектов исследования наложила отпечаток на методику изучения. Структурные и текстурные особенности подземных льдов изучены в ходе документации керна скважин, пройденных без применения промывочных растворов (с продувкой забоя сжатым воздухом). Суровые климатические условия при отборе проб льда (температура воздуха в зимнее время достигала $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$), необходимость поддержания мерзлого состояния керна для фиксации текстурных особенностей на фото, малые количества отбираемого льда являлись дополнительными факторами, осложняющими получение, сохранение и анализ данных и требующими адаптации существующих методик к реальным условиям исследования.

Макрокомпонентный и микрокомпонентный состав подземных льдов и вод определен лабораторными методами (химическим, атомно-абсорбционным, спектрофотометрическим, хроматографическим и др.) в Байкальском аналитическом центре коллективного пользования Иркутского научного центра СО РАН (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.513593) методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе ELEMENT-2 (Finnigan MAT, Германия). Анализы стабильных изотопов воды (^2H , ^{18}O , ^{37}Cl и ^{81}Br) выполнены в Университете Ватерлоо (Онтарио, Канада) методом Isotope Ratio Mass Spectrometry (IRMS), в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.518986) и в Китайском университете Геонаук (Ухань) на масс-спектрометрах Thermo Finnigan MAT 253. Изотопные стронциевые отношения ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) определены в Страсбургском университете (Франция) на масс-спектрометре VG Sector и в ИЗК СО РАН (г. Иркутск) на приборе Finnigan MAT 262 с термической ионизацией в одноленточном режиме на ренийевых лентах (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.513593).

Физико-химическое моделирование на основе программного комплекса HydroGeo (М.Б. Букаты) применялось на этапе решения вопросов формирования и эволюции химического состава подземных вод.

Достоверность научных результатов обеспечена созданным банком данных – результатов химического анализа около 2000 проб подземных вод, льдов и пород, полученных высокоточными методами в аккредитованных лабораториях, включая зарубежные; хорошими показателями прецизионности результатов; апробацией основных научных положений на российских и международных форумах и публикацией в рецензируемых журналах; выполнением заданий государственных программ, интеграционных и международных проектов.

Научная новизна работы:

- изучено строение и текстурные особенности мёрзлых толщ, химический состав подземных льдов в осадочных и магматических горных породах;

- впервые определено содержание более 40 микрокомпонентов и редкоземельных элементов в подземных льдах интрузивных (кимберлитах), осадочных и терригенно-карбонатных (известняки, доломиты, песчаники) пород Западной Якутии и обоснован возможный механизм их накопления;

- выявлены ведущие процессы формирования химического состава соленых подземных вод и рассолов на основе расчета равновесий в системе вода-порода;

- впервые на основе изучения стабильных изотопов (^2H , ^{18}O , ^{37}Cl , ^{81}Br , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) определены ведущие генетические признаки подземных льдов и солёных вод и рассолов;

- выполнена прогнозная оценка ресурсов гидроминерального сырья и обоснована перспективность использования дренажных рассолов для извлечения ценных компонентов.

Практическая значимость.

Результаты изучения подземных льдов, солёных вод и рассолов позволили решить конкретные практические задачи алмазодобывающих предприятий в Западной Якутии: оценить ёмкость мёрзлых массивов в связи с захоронением в них дренажных рассолов, поступающих в карьеры; обосновать размещение экспериментальных полигонов для экологически безопасной изоляции рассолов при отработке месторождений; выполнить мониторинг геохимической обстановки в районах интенсивного освоения и оценить качество подземных и поверхностных вод; оценить прогнозные ресурсы дренажных рассолов для целей использования их в качестве гидроминерального сырья.

Защищаемые положения.

1. Западная Якутия объединяет три разнопорядковые криогидрогеологические системы (структуры) – Оленёкский, Верхневиллюйский и Средневиллюйский криоартезианские бассейны. Их гидрогеологические особенности обусловлены широким развитием палеозойских терригенных, карбонатных и галогенных толщ, трапповых и кимберлитовых полей, наличием регионально выдержанных рассолоносных комплексов и глубоким охлаждением геологического разреза.

2. Глубокое промерзание обводненных осадочных и магматических пород артезианских бассейнов в позднем кайнозое сопровождалось подземным льдообразованием. Специфика геохимии подземных льдов - результат взаимодействия в системе вода-порода. Переход в раствор карбонатных, сульфатных и хлоридных солей происходил до эпохи

похолодания, а современный химический состав подземных льдов обусловлен процессами криогенеза.

3. Вертикальную гидрогеохимическую зональность немерзлых толщ криоартезианских бассейнов формируют хлоридные рассолы натриевого, а также смешанного катионного состава. Они приурочены к надсолевым, соленосным и подсолевым водоносным комплексам или заполняют бессолевой разрез бассейнов. Рассолы имеют признаки метеогенных и седиментогенных вод, а также их смешения в ходе геологической эволюции системы вода-порода.

4. Вариации стабильных изотопов (^2H , ^{18}O , $\delta^{37}\text{Cl}$, $\delta^{81}\text{Br}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) являются важнейшим генетическим признаком формирования рассолов в результате либо растворения галогенных горных пород, либо глубокого преобразования захороненной рапы солеродных бассейнов в условиях различной степени закрытости гидрогеологических систем.

5. Криоартезианские бассейны входят в состав крупнейшей Сибирской гидроминеральной провинции. Содержание лития, брома, стронция, рубидия в рассолах позволяет рассматривать их как важнейшее промышленное сырье, альтернативное твердым полезным ископаемым. Эксплуатационные запасы дренажных хлоридных кальциевых рассолов алмазодобывающих карьеров являются достаточной базой для организации безотходного производства ценных компонентов.

Апробация. Результаты авторских исследований и основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и всесоюзных научных форумах: на XI, XII, XIII Всесоюз. совещаниях по подземным водам Востока СССР (Чита, 1985, Иркутск-Южно-Сахалинск, 1988, Иркутск-Томск, 1991); XIV, XV, XVI, XVII, XVIII, XIX, XX Всеросс. совещаниях по подземным водам Востока России (Иркутск, 1994, 2000, 2006, 2012, Тюмень, 1997, 2009, Красноярск, 2003); Первом Всесоюз. съезде инженеров-геологов, гидрогеологов и геокриологов (Киев, 1988); расширенных заседаниях Научного Совета по криологии Земли АН СССР (Москва, 1987, 1988, 1989, 1990); Третьем Междунар. симпозиуме «Горное дело в Арктике» (Санкт-Петербург, 1994); Первой, Второй, Третьей и Четвертой конференциях геокриологов России (Москва, 1996, 2001, 2005, 2011); Четвертом Междунар. междисциплинарном научном симпозиуме «Закономерности строения и эволюции геосфер» (Хабаровск, 1998); Пятых, Шестых, Седьмых Толстихинских чтениях (Санкт-Петербург, 1996, 1997, 1998); Междунар. конференции «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже III-го тысячелетия» (Томск, 2000); Научно-практической конференции «Современные проблемы гидрогеологии и гидрогеомеханики» (Санкт-Петербург, 2002); Междунар. конференции «Фундаментальные проблемы современной гидрогеохимии» (Томск, 2004); Междунар. конференции «Приоритетные направления в изучении криосферы Земли» (Пушино, Московской обл., 2005); Междунар. конференции «Криогенные ресурсы полярных регионов» (Салехард, 2007); Междунар. конференции «Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения» (Тюмень, 2008); Всеросс. научно-практического совещания с международным участием «Литий России» (Новосибирск, 2011); Междунар. научно-практической конференции «Проблемы и пути эффективной отработки алмазоносных месторождений» (Мирный, 2011); VIII Междунар. конференции

«Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых» (Новосибирск, 2012); Междунар. научной конференции «Гидрогеология сегодня и завтра: наука, образование, практика» (Москва, 2013); II Всеросс. научной конференции «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами» (Владивосток, 2015); Всеросс. конференции «Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Евразии» (Томск, 2015). GSA Annual Meeting «Science at highest level» (Denver, Colorado, USA, 2002); 9th International Conference on Permafrost (Fairbanks, Alaska, USA, 2008); XXXVIII IAH Congress «Groundwater quality sustainability», Krakow, Poland 2010; Sixth, Eight, Eleventh, Fourteenth International Symposiums on Water-Rock Interaction (Malvern, England, 1989; Vladivostok, Russia, 1995; Saratoga Springs, NY, USA, 2004; Avignon, France, 2013); International Multidisciplinary Conference on Mineral Waters. Genesis, Exploitation, Protection and Valorisation. MinWat2014 (Karlovy Vary (Carlsbad), Czech Republic, 2014); AIG-11: Applied Isotope Geochemistry Conference in Orléans, France (2015).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 75 работ, в том числе две монографии (в соавторстве) и 22 статьи в рецензируемых российских и зарубежных журналах из перечня ВАК. Статьи написаны в соавторстве со специалистами, которые не имеют возражений против защиты данной работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения (233 стр. текста, 65 рисунков, 13 таблиц, 6 приложений). Список литературы включает более 700 источников.

Автор выражает благодарность научному консультанту - доктору геолого-минералогических наук, профессору С.Л. Шварцеву за побуждение к написанию диссертации, внимание к процессу её создания и ценные советы, способствовавшие кристаллизации сути работы. Автор считает своим долгом выразить признательность специалистам и ученым, общение и консультации с которыми на разных этапах исследований оказали формирующее влияние на изложенные в работе идеи и представления: докторам геол.-мин. наук М.Б. Букаты, Е.В. Пиннекеру, Б.И. Писарскому, кандидатам геол.-мин. наук В.Н. Борисову, Б.М. Шенькману, А.М. Кононову. Организация полевых работ проходила при неизменной поддержке на разных этапах сотрудников АК «АЛРОСА» (ПАО): В.А. Павлова, Г.П. Шмарова, Т.И. Дроздовой. Большой объем аналитических работ выполнили специалисты Л.А. Дурбан, Т.Ф. Данилова. Всем названным лицам автор искренне признателен. Особую благодарность я выражаю доктору геол.-мин. наук С.В. Алексееву - многолетнему коллеге по работе, неумолимому полевику, достойному оппоненту в научных дискуссиях, опытному рецензенту совместных научных статей, постоянному соавтору и непримиримому борцу с невежеством - за точность формулировок и чистоту русского языка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ, СОСТОЯНИЕ ЕЁ ИЗУЧЕННОСТИ

История развития и динамика подземной гидросферы тесно связаны и обусловлены общим ходом природного процесса на Земле; исследование механизмов формирова-

ния подземных вод должно опираться на всестороннее изучение комплекса процессов, сформировавших современную геохимическую обстановку. В областях с холодным резко континентальным климатом в зоне развития многолетнемёрзлых пород протекание термодинамических, тепло-массообменных и физико-химических процессов в системе вода-порода имеет свои особенности, обусловленные фазовыми переходами. При замерзании воды происходит совместная кристаллизация льда и солей, вовлечение растворимых веществ в лёд, образование соединений включения, соосаждения. Состав вовлеченных веществ также подвергается трансформации в процессе разложения и миграции. Следовательно, в подземных льдах зашифрована информация о формировании, развитии и геохимических преобразованиях гидрогеологических резервуаров, о процессах взаимодействия в системе вода-горная порода. Степень изученности отдельных генетических типов льда, а также региональных особенностей развития подземных льдов далеко не одинакова. В общем виде процессы льдообразования в породах с жесткими кристаллическими связями анализируются в работах (Шумский, 1955, 1957; Вельмина, 1965; Втюрина, Втюрин, 1970; Втюрин, 1975; Кривоногова, 1976; Иванов, 1998). В Западной Сибири и Российской Арктике подробно изучены строение и генезис залежей пластовых льдов (Данилов, 1990; Анисимова, Крицук, 1983; Шполянская, 1991, 2005; Дубиков, 2002; Фотиев, 2003; Стрелецкая и др., 2006; Шполянская и др., 2007; Крицук, 2010; Слагода и др., 2012; Васильчук, 2012 и др.), химический и изотопный состав льдов (Деревягин и др., 1999, 2003; Васильчук и др., 2006, 2009, 2011; Стрелецкая, Васильев, 2009; Иванова, 2012 и др.). Сведения о подземных льдах Западной Якутии были получены в ходе алмазописковых работ, выполненных в центральной части Якутской алмазональной провинции (Устинова, 1964; Алексеев, Борисов, 1985; Алексеев, Алексеева, 2000; Алексеев, 2000; Алексеев, Пиннекер, 2000; Alexeev, Alexeeva, 2002). Состав и структурно-текстурные особенности глубокозалегающих подземных льдов Западной Якутии изучены очень слабо, поэтому новые знания об особенностях химического и микрокомпонентного (в том числе и редкоземельного) состава глубокозалегающих подземных льдов представляют научный и практический интерес.

Крайне важный аспект эволюции системы вода-порода – проблема генезиса и особенностей формирования рассолов хлоридного состава – продолжает широко обсуждаться в научном мире. Познанием процессов формирования химического состава соленых вод и рассолов занимались как крупные российские ученые – Н.С. Курнаков, М.Г. Валяшко, Н.И. Толстихин, И.К. Зайцев, Е.А. Басков, А.М. Овчинников, В.А. Кирюхин, Е.В. Посохов, Е.В. Пиннекер, К.Е. Питьева, С.Р. Крайнов, П.А. Удодов, В.М. Швец, Б.Н. Рыженко, С.Л. Шварцев, В.И. Ферронский и многие другие, так и зарубежные исследователи - D.J. Bottomley, M. Gascoyne, M. Edmunds, R.H. McNutt, K. Nordsrtom, S.K. Frape, P. Fritz и др. Однако до настоящего времени полной ясности в вопросах генезиса рассолов нет. Особенно проблематично происхождение хлоридных минерализованных вод, насыщающих осадочные терригенно-карбонатные толщи без включений пород галогенных формаций. Именно выявление закономерностей распространения, гидрогеологической зональности и гидрогеохимических особенностей хлоридных кальциевых рассолов в осадочных толщах Западной Якутии с целью обоснования их генезиса является одной из за-

дач данного диссертационного исследования. На это направлено и численное моделирование (с помощью программного комплекса HydroGeo), и изотопные геохимические исследования, позволившие изучить особенности распределения стабильных изотопов (^2H , ^{18}O , ^{37}Cl и ^{81}Br) и изотопного отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в подземных рассолах. В пределах Сибирской платформы история целенаправленного исследования изотопного состава подземных вод началась всего около 40 лет назад (Брандт и др., 1976; Пиннекер и др., 1987; Пиннекер, Шварцев, 1996; Шварцев, 2000; Shouakar-Stash et al, 2002; Алексеев и др., 2007; Shouakar-Stash et al, 2007; Алексеева и др., 2013 и др.). Между тем, изотопная гидрогеохимия является мощным инструментом, который дает дополнительную информацию для решения многих вопросов о генезисе подземных вод, водообменных процессах, о времени пребывания воды в природных резервуарах и т.п.

Высококонцентрированные хлоридные магниевые-кальциевые рассолы Западной Якутии представляют огромные ресурсы гидроминерального сырья. Содержания ценных компонентов в водах многократно превышают их кондиционные концентрации, что позволяет рассматривать природные минерализованные растворы как поликомпонентное промышленное сырье. Исследованиями ресурсной базы гидроминерального сырья на Сибирской платформе с середины прошлого века занимались многие ученые и практики (Е.В. Пиннекер, П.И. Трофимук, И.С. Ломоносов, М.Г. Валяшко, В. А. Твердохлебов, А.С. Анциферов, А.А. Дзюба, В.И. Вожов, А.Э. Конторович, Н.П. Коцупало, Е.В. Зелинская, С.Л. Шварцев, М.Б. Букаты, А.Г. Вахромеев и др.). Исследование закономерностей формирования и распределения некоторых компонентов (брома, лития, рубидия, стронция) в подземных рассолах в связи с перспективами их использования в качестве гидроминерального сырья для промышленных целей имеет огромное прикладное значение и освещено в работе.

2. ОСНОВНЫЕ РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЗАПАДНОЙ ЯКУТИИ

Физико-географические и геокриологические условия, геолого-тектоническое строение региона рассмотрены с использованием опубликованных и фондовых материалов (Мельников, 1966; Ковальский, Брахфогель, 1974; Фотиев и др., 1974; Милашев, 1979; Баулин и др., 1983; Романовский, 1983; Геокриология СССР..., 1989; Гидрогеология..., 1970; Геология СССР, 1970; Авдеев и др., 1978; Геология нефти..., 1981; Храмов и др., 1982; Геология..., 1986; Калинин, Якупов, 1989; Девяткин, 1993; Климовский, Готовцев, 1994; Дучков, Балобаев, 2001; Тектоника..., 2001; Восточная Сибирь..., 2002; Стратиграфия..., 2005, Алексеев, 2009 и др.).

Западная Якутия расположена в бассейнах рр. Вилюй и Оленёк. В геоморфологическом отношении она занимает восточную часть Среднесибирского плоскогорья и северо-западную часть Вилюйской низменности.

В качестве важнейших природных особенностей изучаемого региона, который в геологическом плане является северо-восточной частью Сибирской платформы, необходимо отметить: 1) геологическое строение: древнейший кристаллический фундамент, перекрытый осадочным чехлом переменной мощности (до 4220 м); 2) длительная история формирования с неоднократными процессами рифтогенеза, которые привели к резкой

Особенности гидрогеологического разреза региона обусловлены тремя основными факторами, имеющими различное влияние на формирование и распространение подземных вод. Прежде всего, это длительная геологическая история развития с многофазными этапами кимберлитового и траппового магматизма. Неоднократная тектоническая активизация привела к широкому развитию дизъюнктивных нарушений, что определило специфику проницаемости осадочных толщ чехла. Следующий значимый фактор – неравномерное развитие рифогенных фаций, обширное распространение преимущественно карбонатных отложений, в том числе гипсоносных или галогенных, причем севернее 64° с.ш. мощные выдержанные пласты каменной соли в разрезе отсутствуют. И, наконец, важнейшим фактором формирования подземной гидросферы региона в настоящее время является наличие толщи многолетнемерзлых пород, которые преобразовали гидрогеологическую обстановку доплиоценового периода коренным образом. Преобразования выразились в первую очередь в том, что подземные воды зоны активного водообмена большей частью заморожены, а в зоне затрудненного водообмена находятся минерализованные воды (от солёных до рассолов) с отрицательной и положительной температурой. Пресные подземные воды приурочены к сезонноталому слою и к гидрогенным несквозным подоозерным и подрусловым таликам.

По отношению к многолетнемерзлым породам в криоартезианских бассейнах второго порядка развиты над-, меж- и подмерзлотные воды. *Надмерзлотные* воды с минерализацией до 1,0 г/дм³ представлены водами слоя сезонного оттаивания и несквозных таликов, распространены повсеместно в рыхлых аллювиальных, делювиальных и элювиальных четвертичных отложениях и имеют HCO₃ (иногда Cl-HCO₃) Mg-Ca состав. *Межмерзлотные* подземные воды имеют спорадическое распространение в виде горизонтов ограниченной протяженности. По химическому составу они Cl Ca-Mg или Mg-Ca, по величине минерализации (24-310 г/дм³) – от солёных до крепких рассолов. *Подмерзлотные* воды залегают ниже подошвы многолетнемерзлых пород на различной глубине в зависимости от мощности замороженной толщи и имеют как отрицательную, так и положительную температуру. Рассолы Cl преимущественно Ca, по величине минерализации (31- более 400 г/дм³) - от слабых до весьма крепких.

Для геологического разреза *Оленёкского КАБ* (центральной и юго-западной частей) характерно наличие погребённых рифогенных структур, сложенных эпифитоновыми известняками и кавернозными доломитами. Среди осадочных толщ нижнего палеозоя преобладают известняки (доломитизированные и глинистые), доломиты, мергели. Подмерзлотные воды залегают здесь на глубине от 70 до 2000 м и формируют верхне-, средне-, нижнекембрийский и протерозойский водоносные комплексы, а также обводненные зоны кимберлитовых трубок и траппов. Подземные воды верхнекембрийского комплекса общей мощностью 370-400 м входят в гидрогеохимическую зону солёных вод, слабых и крепких рассолов и по химическому составу являются Cl Mg-Ca (Ca-Mg) и Na-Ca. Их минерализация изменяется в широких пределах - от 31 до 252 при среднем значении 92 г/дм³. Венд-среднекембрийские водоносные комплексы имеют между собой гидравлическую связь по зонам тектонических нарушений. Подземные воды формируют единый гидрогеологический резервуар, геохимически однообразны и находятся в преде-

лах гидрогеохимической зоны крепких и весьма крепких рассолов Cl Ca (Mg-Ca, Na-Ca) состава. Минерализация рассолов изменяется от 198 до 404 г/дм³ при среднем значении 310 г/дм³ и возрастает в зависимости от глубины залегания водоносных комплексов. Подземные воды, вскрытые в кимберлитовых телах и гидравлически связанные с рассолами в осадочных горных породах, в целом идентичны по составу и минерализации.

В северной части *Верхневиллюйского КАБ* в геологическом разрезе отсутствуют соленосные толщи, а гидрогеологическая ситуация идентична таковой в Оленёкском КАБ. Южнее 64° с.ш. в разрезе с глубины 300-460 м появляются пласты солей нижнего кембрия. Подмерзлотные воды вскрываются в интервале глубин 300-2500 м. Ниже подошвы многолетнемерзлых пород по отношению к пластам соли выделен ряд водоносных комплексов надсолевых, соленосных и подсолевых отложений. Надсолевой средне-нижнекембрийский водоносный комплекс имеет региональное распространение, приурочен к отложениям метегерской и ичерской свит, которые представлены известковистыми доломитами, загипсованными пористыми кавернозными, чередующимися с трещиноватыми известняками. Суммарная эффективная мощность нескольких пластов-коллекторов не превышает 10-30 м; по химическому составу рассолы метегеро-ичерского водоносного комплекса Cl Na с минерализацией 28-300 г/дм³, которая изменяется с глубиной. В кровельной части комплекса она не превышает 50 г/дм³. В средней части минерализация увеличивается до 100-150, а в нижней – может достигать 300 г/дм³. Особенностью газового состава подземных вод комплекса является наличие в них сероводорода. Среднее его содержание изменяется от 22 до 105 мг/дм³, а в районе трубки Мир составляет 90-120 мг/дм³. Соленосный водоносный комплекс приурочен к слабопроницаемым межсолевым карбонатным породам нижнего кембрия, образующим маломощные пласты-коллекторы. По химическому составу рассолы – Cl Ca, по минерализации – весьма крепкие (350-400 г/дм³). Подсолевой водоносный комплекс приурочен главным образом к терригенным венд-нижнекембрийским отложениям, залегающим на глубине более 1500 м. Подземные воды комплекса являются весьма крепкими рассолами Cl Ca или Na-Ca состава с минерализацией 350-450 г/дм³.

Гидрогеологические условия *Средневиллюйского КАБ* определяются положением его на стыке Якутского АБ и Оленёкского КАБ, а также отсутствием соленосных отложений со сплошным развитием многолетней мерзлоты. Осадочный чехол бассейна составляют юрские песчаники, алевролиты и аргиллиты, триасовая кора выветривания, терригенные, терригенно-карбонатные и карбонатные отложения нижнего ордовика, кембрия и венда, изверженные породы среднепалеозойского возраста. Подмерзлотные подземные воды вскрываются ниже подошвы многолетнемерзлых пород с глубины 422-433 м и формируют ордовикский, верхнекембрийский, среднекембрийский, венд-нижнекембрийский и вендский водоносные комплексы. Водовмещающими породами водоносных комплексов являются доломиты, мергели, доломитистые известняки, нередко глинистые. Высокая глинистость разреза обусловила низкие фильтрационные свойства водоносных комплексов. По химическому составу подземные воды ордовикского комплекса – Cl Mg-Ca с минерализацией до 252 г/дм³, воды верхнекембрийского комплекса –

крепкие рассолы Cl Ca с минерализацией до 323 г/дм^3 . Воды венд-нижне-среднекембрийских комплексов практически не изучены.

4. ГЕОХИМИЯ ПОДЗЕМНЫХ ТЕКСТУРООБРАЗУЮЩИХ ЛЬДОВ

Исследование состава подземных льдов важно для определения источников их формирования, взаимосвязи с подземными или поверхностными водами, особенностей гидродинамического режима в период промерзания водовмещающих горных пород. Изучение подземных текстурообразующих льдов было инициировано при решении конкретных научно-прикладных задач в ходе освоения месторождений алмазов Западной Якутии. Криогенное строение мерзлых толщ, особенности распределения в разрезе и геохимические свойства подземных льдов исследованы в пределах трех крупных алмазоносных районов: Верхнемунского, Далдыно-Алаakitского (Оленёкский КАБ) и Среднемархинского (Средневилюйский КАБ) как в осадочных отложениях, так и в кимберлитовых телах.

История развития, особенности распространения мерзлых пород, строение мерзлой толщи и криогенное строение пород в долинах рек Вилюй, Малая Ботуобия, Марха, Далдын, а также на водораздельных пространствах изучены достаточно детально. Результаты исследования автора существенно дополнили банк данных о подземных льдах и расширили представления о подземном льдообразовании в скальных горных породах. В целом в алмазоносных районах выделяются два типа текстурообразующих льдов – подземные льды интрузивных пород (кимберлитовых тел) и подземные льды терригенно-осадочных и терригенно-карбонатных толщ (вмещающих пород). Криогенное строение кимберлитовых тел обусловлено преимущественно экзогенной трещиноватостью. Трещины обладают различной степенью раскрытости и бессистемной ориентировкой, а криогенные текстуры в основном – трещинные, трещинно-жильные и базальные. Строение эпикриогенных осадочных толщ более разнообразное. В них преобладают контактные, корковые, трещинные, пластово-трещинно-карстовые незакономерно-сетчатые полновыраженные текстуры. Такое многообразие унаследованных криогенных текстур в породах различного литологического состава и сложения в Западной Якутии определено эпигенетическим промерзанием осадочного чехла, прорванного многочисленными интрузивными телами.

Геохимические особенности состава подземных льдов (табл. 1) унаследованы от обстановки, существовавшей к началу эпохи похолодания, что подтверждается результатами водных вытяжек. Засоленность вмещающих пород отражает первичную засоленность, связанную с условиями осадконакопления, и является основой формирования состава подземных льдов при промерзании отложений. С глубиной в подземных льдах происходит незначительное уменьшение содержания гидрокарбонатов кальция и магния, стадийное увеличение содержания сначала сульфатов натрия, магния и кальция, а затем хлоридов. Подобная закономерность обусловлена криогенным концентрированием подземных вод при их промерзании. Согласно палеогеокриологическим реконструкциям в период минимума сартанской холодной эпохи (18 тыс. лет назад) температура мерзлых пород в Якутии была ниже современной на $10-13 \text{ }^\circ\text{C}$. События позднеплейстоценового криохрона привели к дифференциации солей между фазами в период формирования под-

земных льдов. Ряд солей достигал состояния эвтектики. Осаждение карбонатов кальция и магния было связано с изменением состояния карбонатной системы и сдвигом равновесий в сторону монокарбонатов. Кристаллизация гексагидрата ($MgSO_4 \cdot 6H_2O$), мирабилита ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$) могла происходить в результате существенного снижения их растворимости при отрицательной температуре геологического разреза. Хлориды магния и кальция накапливались в результате отжатия более концентрированного раствора при продвижении фронта промерзания вниз от поверхности.

Таблица 1. Химический состав подземных текстуробразующих льдов алмазоносных районов Западной Якутии

Глубина отбора пробы, м	pH	Ионный состав, мг/дм ³								Сумма ионов, мг/дм ³
		K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	Br ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	
Верхнемунский алмазоносный район										
2-2,5	7,4	2,0	2,0	24,7	4,8	5,7	0,2	<2	136,7	176,1
3,8-4,3	7,1	3,6	2,7	26,5	8,8	10,3	0,2	3,0	145,2	200,4
12-14	7,2	1,6	1,0	5,5	6,4	3,6	<0,1	<2	45,2	63,2
18,5-20	7,0	4,6	14,5	21,3	13,0	27,3	0,1	4,0	133,0	217,9
38-40	7,0	3,3	3,1	9,61	13,2	7,1	<0,1	<2	90,3	126,7
42-52	9,4	19,0	28,6	0,7	5,6	18,4	0,2	2,0	61,0	143,2
55-56,5	7,1	11,6	18,1	15,2	29,1	75,2	0,9	<2	94,0	244,0
Далдыно-Алаakitский алмазоносный район										
103-123,5	7,7	3,3	10,5	15,4	37,1	9,2	0,1	43,0	180,6	299,2
221-228	8,2	15,7	1,5	10,2	17,3	5,7	<0,1	18,0	122,0	190,4
Среднемархинский алмазоносный район										
14-17,5	7,5	4,7	24,3	10,3	30,1	21,6	<0,1	30,5	146,5	267,9
26,5	7,7	5,6	38,5	15,2	40,1	63,1	–	64,6	119,6	346,7
41-43	<8,0	11,2	100,8	50,5	112,2	310,2	–	211,9	83,0	879,8
59-77	7,8	18,6	74,1	42,6	145,3	221,6	–	257,6	141,6	901,3
118-119	<8,0	23,3	131,9	90,0	172,3	615,1	–	207,8	100,1	1340,5
129-130	<8,0	43,2	310,0	255,4	430,9	1763,1	21,5	237,5	63,5	3133,9

В результате ранее выполненных исследований в Далдыно-Алаakitском алмазоносном районе выделены три геохимических типа подземных льдов: HCO₃, HCO₃-Cl и Cl (Алексеев, Пиннекер, 2000; Алексеев, Алексеева, 2000). Катионный состав смешанный – Ca-Mg или Mg-Ca. До глубины 130-150 м минерализация подземных льдов в пределах кимберлитовых трубок Зарница, Якутская, а также во вмещающих терригенно-карбонатных породах верхнего кембрия не превышает 0,1-0,4 г/дм³. С глубины 160-180 м она увеличивается до 1,0, а в интервале 180-220 м достигает 6,5-12 г/дм³. Анализ новых данных, полученных при бурении скважин в терригенно-осадочных породах карбона, карбонатах нижнего силура и ордовика в районе кимберлитовой трубки Юбилейная показал, что подземные льды имеют SO₄-HCO₃ Mg-Ca состав. Содержание хлоридов не превышает 9 мг/дм³ или 6 %-экв. Минерализация подземных льдов составляет 190-378 мг/дм³ и хорошо согласуется с выявленным ранее трендом (рис. 2).

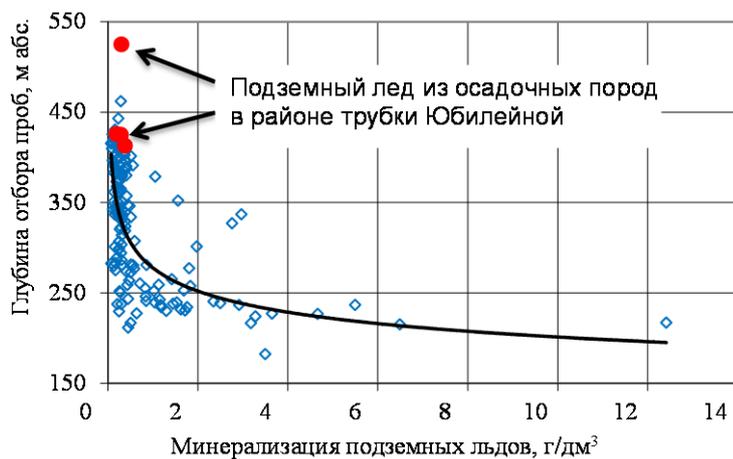


Рис. 2. Изменение минерализации подземных льдов с глубиной в Далдыно-Алакитском алмазоносном районе (Оленёкский КАБ).

Особенности *микрокомпонентного* состава отражают условия формирования льдов в геологической среде при конкретном температурном режиме кристаллизации. Для оценки содержания микрокомпонентов и выявления закономерностей их распределения выполнено определение содержания более 40 элементов в глубокозалегающих подземных льдах интрузивных (кимберлитах) и осадочных и терригенно-

карбонатных (известняки, доломиты, песчаники) породах Западной Якутии (табл. 2, рис. 3).

Анализ данных показал, что в целом для подземных льдов кимберлитов характерны более низкие по сравнению со льдами осадочных отложений содержания микрокомпонентов. Исключение составляют P, Ti, Cu, Zn, Y, Zr, Pb и Th, средние концентрации которых превышают таковые во вмещающих породах в 2-45 раз. Закономерности распределения микрокомпонентов в подземных льдах осадочных отложений в основном коррелируют с их распределением во льдах кимберлитов.

Наиболее заметные отклонения в сторону превышения содержания наблюдаются для Br, Sr, Mo, Cd, Sb, W, Re и U, а меньшие концентрации характерны для Cr, Nb, Hf и Th. Значительное обогащение подземных льдов осадочных отложений Далдыно-Алакитского района отмечается только для Al, Ti, Fe (более чем в 10 раз), Sn (почти в 50 раз). Во льдах вмещающих пород Среднемархинского районов фиксируются повышенные концентрации Co, Ni, Ge, As, Sb, Sr, U, а содержание Br здесь наиболее высокое в Западной Якутии.

При сравнении с речными водами области криолитозоны (бассейн р. Сытыкан, Далдыно-Алакитский район) в подземных льдах установлено повышенное содержание всех микрокомпонентов, кроме Sc, Cr и Hf (концентрация которых в речных водах ниже предела определения). Особенно велико обогащение подземных льдов Li, B, Ti, Mn, Fe, Ni, Br, Rb, Sr, Mo, Sb, W, Pb, Bi и Th.

Содержание *редкоземельных элементов* в подземных льдах Западной Якутии в целом изменяется от десятитысячных долей мкг/л для тяжелых РЗЭ до 0,57 мкг/л для легких РЗЭ (в работе приведены значения каждого из 14 элементов для подземных льдов с глубины от 2 до 225 м в пределах трех алмазоносных районов). Для подземных льдов кимберлитов характерны повышенные в 1,5-5 раз концентрации РЗЭ по сравнению с подземными льдами осадочных отложений, причем большее обогащение наблюдается легкими элементами (La-Sm). Общей закономерностью для подземных льдов и поверхност-

ных вод района является высокое содержание европия и ярко выраженная положительная его аномалия на кривой распределения РЗЭ (рис. 4).

Таблица 2. Среднее содержание микрокомпонентов (мкг/дм³) в подземных текстурообразующих льдах и речных водах Западной Якутии (прочерк – нет данных)

Микрокомпоненты	Верхнемунский район (кимберлиты)	Далдыно-Алакитский район (песчаники, известняки)	Среднемархинский район		Р. Сытыкан
			песчаники, известняки	кимберлиты	
Li	6,89	49,35	129,12	17,95	11,7
B	221,08	665,93	882,36	163,35	63
Al	34,45	168,6	9,48	237,15	9,3
Si	791,43	733,84	1611,73	654,05	865
P	48,80	11,65	7,38	39,4	9,8
S	3327,9	–	75352	–	5099
Sc	0,02	0,03	0,09	–	0,64
Ti	2,92	5,26	0,46	15,95	0,42
V	1,3	1,13	3,31	1,2	0,37
Cr	2,83	0,49	0,19	–	0,75
Mn	7,82	18,54	104,62	100,55	2,49
Fe	104,33	75,55	3,31	19,45	4,72
Co	0,23	0,73	10,4	2,7	0,07
Ni	7,57	5,08	45,57	–	1,24
Cu	3,66	1,71	2,22	6,78	3,1
Zn	5,05	5,73	7,94	16,2	9,9
Ga	0,02	0,2	0,1	0,16	0,004
Ge	0,008	0,03	0,14	–	0,49
As	0,58	0,86	11,47	–	0,44
Se	0,18	0,18	1,38	–	–
Br	437,3	306,83	9914,72	–	172
Rb	4,44	14,16	23,59	10,17	1,14
Sr	391,1	678,1	3446,43	351,2	195
Y	0,04	0,04	0,03	0,65	0,03
Zr	0,13	0,21	0,04	1,6	0,18
Nb	0,02	0,01	0,002	–	0,001
Mo	0,69	45,38	56,85	1,73	0,39
Ag	0,01	0,01	–	–	–
Cd	0,02	0,45	0,02	0,07	–
Sn	–	1,1	0,02	–	0,02
Sb	0,14	1,42	0,14	0,64	0,29
Cs	0,009	0,09	62,29	0,14	0,003
Ba	46,53	37,01	0,001	6,57	65
Hf	0,003	0,01	0,73	–	0,005
Ta	0,0005	0,0008	–	–	–
W	0,22	1,46	0,14	–	0,06
Re	0,0012	0,02	0,05	–	0,001
Au	0,015	–	–	–	–
Tl	0,048	0,03	0,12	0,06	–
Pb	1,80	0,04	0,05	0,88	0,04
Bi	0,034	–	0,02	0,01	0,0004
Th	0,028	0,01	0,02	0,22	0,001
U	0,06	0,75	5,28	0,18	0,48

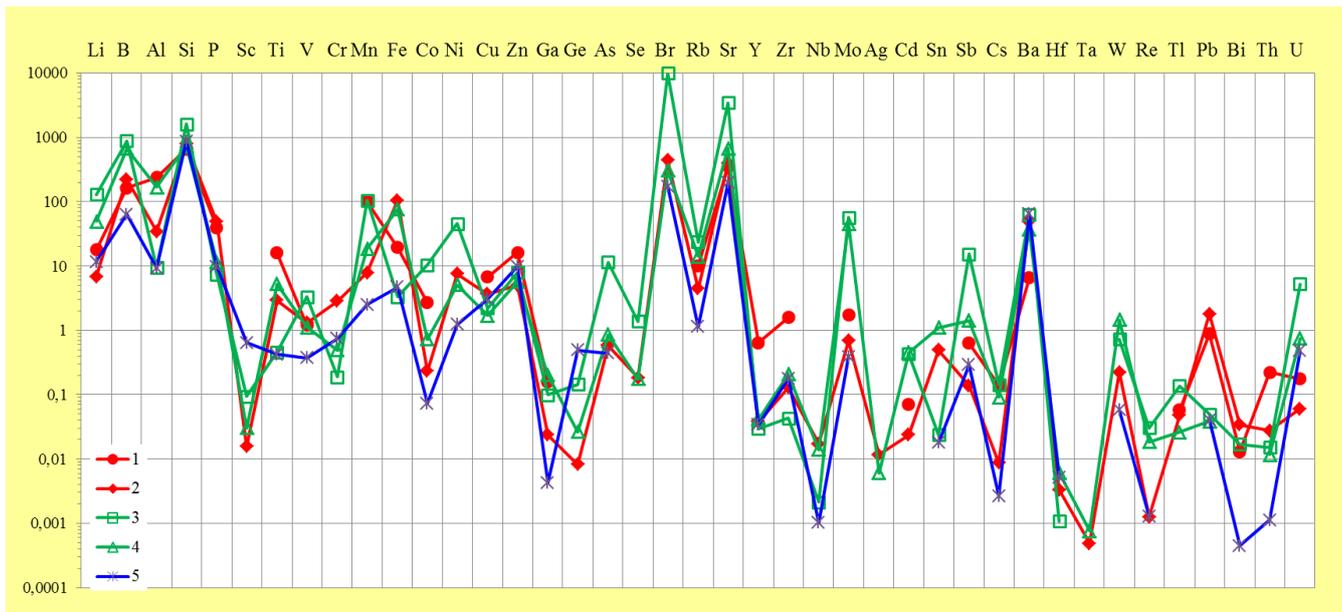


Рис. 3. Среднее содержание микрокомпонентов в подземных льдах кимберлитов и осадочных пород Западной Якутии (мкг/дм³). В кимберлитах: 1 - трубка Ботуобинская (Средневилюйский КАБ); 2 - трубка Новинка (Оленёкский КАБ); в осадочных породах: 3 - междуречье Накына и Ханни (Средневилюйский КАБ); 4 - верховья р. Мархи и левобережье р. Далдын (Оленёкский КАБ); 5 – вода р. Сытыкан.

Относительно океанских вод содержание легких РЗЭ в подземных льдах кимберлитов и осадочных отложений в среднем на два порядка, а тяжелых РЗЭ – на порядок больше, и характерная для поверхностных вод океана отрицательная аномалия церия не проявляется. При сравнении содержаний РЗЭ в подземных льдах с концентрациями РЗЭ в осадочных породах и кимберлитах выявляется не только громадная разница в абсолютных содержаниях (в сотни и даже десятки тысяч раз), но и совершенно непохожие формы спектра лантаноидов.

Для осадочных отложений характерен пологий, субгоризонтальный профиль распределения редких элементов, а в кимберлитах наблюдается существенное преобладание

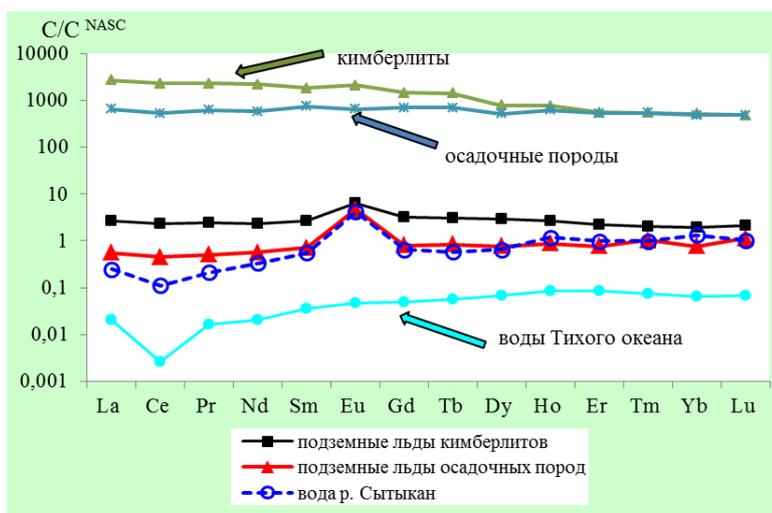


Рис. 4. Среднее содержание РЗЭ (нормализованное на NASC – Северо-Американский сланец) в подземных льдах Западной Якутии. Данные по содержанию РЗЭ в кимберлитах и осадочных породах (Балашов, 1976), в океанских водах (Zhang, Nozaki, 1996).

легких РЗЭ, концентрации которых достигают 86 (La) и 170 (Ce) мкг/кг. Для подземных льдов в кимберлитах концентрация легких и тяжелых РЗЭ почти одинакова, а для подземных льдов в осадочных отложениях наблюдается даже небольшое превышение содержания тяжелых лантаноидов над легкими.

Наличие в породах этих химических соединений связано с условиями образования осадочных толщ и кимберлитовых трубок. В палеозое и раннем мезозое на Сибирской платформе моря занимали

огромные пространства (Геология, гидрогеология..., 1986). В ходе испарительного концентрирования в солеродных бассейнах происходила садка известняков, доломитов, мергелей, отлагался терригенный материал (песчаники, алевролиты и т. п.). По условиям образования отложения были в значительной степени засолены. В них накапливались соединения, обладающие потенциальной способностью перехода в раствор. Это не только растворимые соединения (карбонаты кальция и магния, гипс и ангидрит, рассеянный галит и т.д.), но и растворы, пропитывающие породу, и обменные катионы, находящиеся в поглощенном состоянии. Также и кимберлитовая магма при ее внедрении в осадочный разрез была насыщена сульфатными, хлоридными солями, широким спектром микрокомпонентов. Их привнос в подземные воды обеспечили процессы выщелачивания и растворения. Процессы многолетнего промерзания платформенного чехла в позднем кайнозое обусловили формирование подземных льдов в горных породах и перестройку гидрогеохимического разреза зоны активного водообмена. Причем их результаты наиболее отчетливо проявились в гидрокарбонатных водах. Глубокое охлаждение горных пород в криохроны сопровождалось концентрированием подземных вод, осаждением карбонатных и сульфатных солей, ростом концентрации легкорастворимых соединений в составе подземных льдов.

Обогащение или обеднение подземных льдов микрокомпонентами непосредственно связано с первичным составом подземных вод, насыщающих горные породы. Повышенная глинистость осадочного разреза Оленёкского КАБ способствовала накоплению в подземных водах алюминия, титана, железа. Высокие концентрации микрокомпонентов в подземных льдах осадочных отложений Средневилуйского КАБ связаны, вероятнее всего, с наличием прослоев бурого угля в юрской толще. При взаимодействии подземных вод с юрскими углистыми терригенно-осадочными отложениями происходило выщелачивание микроэлементов, которые присутствуют в углях в виде минеральных примесей (глинистых минералов, солей щелочных металлов и железа, иногда повышенных содержаниях германия, урана, вольфрама и др.).

Особенности распределения РЗЭ в подземных льдах не наследуют таковые ни в кимберлитах, ни в осадочных породах. Профиль распределения редкоземельных элементов, состав которых нормализован на состав Северо-Американского сланца (NASC) (Gromet et al., 1984), в подземных льдах отличается ярко выраженной положительной европиевой аномалией. Средняя величина $Eu_{an} = Eu/Eu^{NASC} / (1/2 \times Sm/Sm^{NASC} + 1/2 \times Gd/Gd^{NASC})$, рассчитанная для подземных льдов довольно значительная: 2,1 – в кимберлитах, 6,2 – в осадочных отложениях, а для речных вод – максимальная – 6,9. Не исключено, что обогащение европием происходило в процессе диагенеза осадков в условиях хорошей аэрации. Однако, учитывая огромные масштабы щелочно-ультраосновного (кимберлитового) и щелочного (траппового) магматизма в период палеозойско-мезозойской активизации Сибирской платформы, можно предполагать, что накопление РЗЭ (в том числе европия) в растворах связано именно с переработкой пород как основного, так и ультраосновного составов в ходе гидротермального процесса. При этом прогрев водосодержащих осадочных пород в тепловом поле интрузивных тел составлял 200-800°C (Феоктистов, 1978; Летников и др., 1978). Европий в гидротермальном флюиде при

температуре 300-400 °С находится в степени окисления 2+, он может замещать кальций в структуре плагиоклаза и других кальцийсодержащих минералах и вместе с кальцием переходить в раствор (Дубинин, 2006). Кроме того, поскольку для щелочных базальтов характерно повышенное содержание европия в составе РЗЭ, аномалия Eu в подземных льдах может быть обусловлена поступлением этого элемента в жидкую фазу в процессе взаимодействия с внедряющимися траппами.

Распределение РЗЭ в подземных водах, являющихся источником образования подземных льдов, отражает обстановки формирования осадочных отложений. Тип литогенеза характеризует отношение $\sum Ce/\sum Y$ (где $\sum Ce = \sum (La-Gd)$, $\sum Y = \sum (Tb-Lu, Y)$), а его значение 2,5-4 выступает границей аридного и гумидного климатов: <2,5 – аридные, >4 – гумидные климатические условия (Шатров, 2007). Для осадочных пород Западной Якутии отношение $\sum Ce/\sum Y$ в среднем составляет 1,3, что говорит об аридном климате в период их образования, показателем которого являются обильная карбонатность и засоленность осадков. Отношения, характеризующие фациальные условия, в подземных льдах осадочных отложений La/Sm (4,3), Ce/Sm (8,0), Yb/Sm (0,5), Y/Sm (8,4) близки по распространенности РЗЭ в шельфовых водах (Балашов, 1976) и свидетельствуют о прибрежных, мелководных условиях образования осадочных карбонатных и терригенно-карбонатных толщ.

5. ГЕОХИМИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ СОЛЁНЫХ ВОД И РАССОЛОВ

Ведущую роль в формировании и распространении хлоридных солёных вод и рассолов в Западной Якутии играют пласты каменной соли, точнее их наличие или отсутствие в геологическом разрезе. Следовательно, целесообразно отдельно охарактеризовать подземные воды юго-западного (соленосного) и северо-восточного (несоленосного) регионов (табл. 3).

В соленосных регионах (Верхневилуйский КАБ) *надсолевые* водоносные комплексы вмещают карбонатные отложения метегерской и ичерской свит раннего и среднего кембрия. Они представлены хлоридными натриевыми рассолами выщелачивания. Минерализация подземных вод пестрая: от 30 до 165 г/дм³, т.е. достигает концентрации крепких рассолов. Величина рН составляет 7-8. Хлор преобладают среди анионов – до 98 %-экв., и среди катионов ведущим является натрий (85-90 %-экв.), содержание магния и кальция примерно одинаково и незначительно – 2-8 %-экв. Концентрации микрокомпонентов в рассолах комплекса невысокие, что характерно для рассолов выщелачивания. С ростом величины минерализации подземных вод содержание натрия и хлора увеличивается, а минерализация вод растет с глубиной. Генетические коэффициенты ($Cl/Br=1060$ и $rNa/rCl=0,95-1,0$) указывают на инфильтрационное происхождение этих рассолов, т.е. состав жидкой фазы формировался в процессе растворения галогенных минералов метеорными водами. Специфика газового состава рассолов надсолевых отложений метегеро-ичерской свиты определяется наличием сероводорода в этом типе вод. Рассолы *соленосного* водоносного комплекса приурочены к слабопроницаемым межсолевым карбонатным породам нижнего кембрия. По химическому составу рассолы - хлоридные

Таблица 3. Химический состав подземных вод криоартезианских бассейнов Западной Якутии

Глубина отбора пробы, м	pH	Удельный вес	Ионный состав, г/дм ³								мг/дм ³			Сумма ионов, г/дм ³
			K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	Br ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Li ⁺	Rb ⁺	Sr ²⁺	
<i>Верхневиллойский КАБ: надсолевой водоносный комплекс</i>														
500	5,2	1,06	0,0	31,9	0,9	1,6	51,1	0,05	5,8	0,5	0,50	0,1	13,4	91,4
320-480	7,8	1,06	0,1	31,1	0,9	1,5	48,9	0,03	5,8	0,1	0,54	0,0	56,0	88,4
325	7,7	1,08	0,1	44,7	0,6	1,9	69,8	0,05	5,2	0,3	0,50	0,2	13,7	122,7
500	7,8	1,06	0,1	28,4	0,8	1,6	47,6	0,05	5,7	0,2	0,13	0,0	65,0	84,6
<i>соленосный водоносный комплекс</i>														
800	5,0	1,31	9,2	9,6	18,7	112,3	276,0	6,7	0,0	0,1	33,5	3,4	2184,5	433,8
600	5,5	1,31	9,0	8,6	21,4	109,3	278,6	6,5	0,2	0,2	42,3	4,5	2378,6	434,9
1000	5,5	1,31	9,3	9,1	22,5	114,8	290,8	6,7	0,0	0,1	35,8	3,4	2330,1	444,6
790	5,2	1,30	8,7	10,2	15,8	112,3	269,0	6,1	0,0	0,2	90,5	4,3	2208,7	423,4
<i>подсолевой водоносный комплекс</i>														
1896-1906	5,0	1,28	16,8		16,7	97,6	247,5	5,7	0	0,04	-	-	-	384,4
1677-1690	4,0	1,26	36,9		14,0	67,0	216,3	2,2	0,2	0,02	-	-	-	334,4
1905-1909	5,5	1,26	49,2		12,2	76,2	244,7	1,9	0,1	0,86	-	-	-	384,7
2655-2665	5,1	1,24	1,2	63,6	2,0	59,4	210	3,0	0,1	0,04	-	-	-	339,4
<i>Средневиллойский КАБ: верхнекембрийский водоносный комплекс</i>														
197	6,35	1,045	0,5	5,7	3,6	11,2	39,2	0,6	0,9	0,0	8,4	0,9	0,0	221,6
430	6,65	1,11	28,7		4,9	20,0	93,0		1,1	0,1	-	-	-	147,9
600	6,6	1,16	23,6		14,6	40,1	147,7		0,7	0,1	-	-	-	78,3
700	6,1	1,21	31,5		12,8	58,1	186,1		0,7	0,0	-	-	-	113,6
<i>Оленёкский КАБ: верхнекембрийский водоносный комплекс</i>														
51	3,9	1,05	2,0	7,7	4,1	11,7	44,9	0,9	0,6	0,02	24,8	1,7	211,0	71,8
130-140	6,8	1,05	1,1	4,8	5,0	8,5	37,7	0,7	1,2	0,01	15,8	1,0	138,5	59,1
130	6,5	1,06	1,8	7,7	6,9	9,8	48,7	0,8	1,0	0,1	15,5	1,1	535,8	76,8
210	7,8	1,03	0,6	3,9	2,6	6,8	24,5	0,4	1,1	0,02	13,0	0,8	241,0	39,9
319	5,5	1,11	2,9	10,9	15,0	22,1	98,8	2,2	0,5	0,1	35,1	1,2	463,3	152,4
<i>вент-среднекембрийские водоносные комплексы</i>														
640	5,2	1,26	13,1	25,6	15,5	77,6	230,9	4,7	0,1	0,2	130,5	15,3	858,5	367,7
700	5,6	1,27	17,2	24,7	16,0	81,6	241,3	4,7	0,1	0,2	156	16,6	1275,0	385,9
1050	5,0	1,28	18,8	18,9	17,1	86,2	250,2	6,0	0,1	0,5	415,3	3,52	1552,0	391,7
550	6,1	1,27	14,5	28,3	15,3	76,4	232,0	4,2	0,1	0,2	113	7,8	1250,0	371,0

Примечание: прочерк – нет данных.

кальциевые с минерализацией от 170 до более 440 г/дм³. Среди катионов доминирует кальций (до 75 %-экв.), магний и натрий присутствуют в существенно меньших количествах, причем в соотношении $Mg \geq Na$. Содержание магния может значительно увеличиваться – до 23 %-экв. Хлор-ион – основной анион в составе рассолов – до 99 %-экв. Содержание микрокомпонентов гораздо выше, чем в надсолевых водоносных комплексах, причем оно заметно увеличивается с ростом минерализации подземных вод, что также характерно для всех крепких седиментационных рассолов района.

Подсолевой водоносный комплекс – это крепкие и весьма крепкие рассолы с минерализацией 260-430 г/дм³. Анионный состав традиционно и безусловно хлоридный, сульфат- и гидрокарбонат-ионы либо совсем отсутствуют, либо среднее содержание не превышает десятых долей г/дм³. Катионы представлены всегда четырьмя элементами с типичным соотношением между ними $Ca > Na > Mg \gg K$. Характеристические коэффициенты (Cl/Br 40-80, rNa/rCl 0,1-0,7) устойчивы при всех значениях минерализации, что отличает их от рассолов выщелачивания надсолевых водоносных комплексов и однозначно указывает на седиментационный генезис рассолов подсолевой формации. Общая газонасыщенность рассолов соленосного и подсолевого комплексов изменяется в широких пределах: от первых единиц до более 1000 см³/дм³. В составе водорастворенных газов превалирует метан.

В несоленосных регионах (Оленёкский и Средневиллюйский КАБ) формирование водоносных комплексов в *рифей-палеозойских отложениях* происходило в условиях моря преимущественно с нормальной (доломиты, известняки, терригенные образования) и иногда с повышенной (гипсы, ангидриты) солёностью. Несмотря на отсутствие каменной соли в разрезе, рассолы, как уже отмечалось, широко распространены. Подмерзлотный – *верхнекембрийский* – водоносный комплекс содержит хлоридные магниевые-кальциевые и кальциевые-магниевые солёные воды и рассолы. Минерализация подземных вод изменяется от 31 до 200 г/дм³, в среднем составляя 85 г/дм³. Среди катионов в большинстве случаев преобладает кальций (до 56 %-экв.), причем в 34 % проб соотношение rCa/rMg меньше единицы. Доля натрия высокая (11-30 %-экв.), иногда больше содержания магния, что отражается в названии типа рассолов – они становятся натриево-кальциевыми. Анионный состав однозначно хлоридный, содержание сульфат- и гидрокарбонат-иона незначительное и в среднем составляет 0,98 и 0,13 г/дм³ соответственно. Концентрации микрокомпонентов довольно высоки: бром – до 2,5, литий – до 0,12, стронций – до 0,9 г/дм³, а разброс значений хлор-бромного Cl/Br (41-84) и натрий-хлорного rNa/rCl (0,1-0,4) отношений невелик. *Венд-среднекембрийские* водоносные комплексы представляют единый гидрогеологический резервуар, содержат крепкие и весьма крепкие рассолы хлоридного кальциевого (натриево-кальциевого, магниевое-натриево-кальциевого) состава. Минерализация подземных вод этих водоносных комплексов изменяется от 198 до 404 г/дм³ при среднем значении 310 г/дм³ и возрастает в зависимости от глубины залегания рассолоносных пород. Для рассолов характерна хорошая взаимосвязь практически всех компонентов состава (Na, Mg, Ca, Cl, Br, Li, Sr) с минерализацией с коэффициентами корреляции 0,8-0,9. Содержание микрокомпонентов (брома, лития, стронция) в подземных рассолах – наиболее высокое из всех подмерзлотных рассолов Оленёкского бассейна: брома

– до 6,7, лития – до 0,415, стронция – до 2,2 г/дм³. Газонасыщенность хлоридных кальциевых рассолов среднекембрийского водоносного комплекса - 1,2 м³/м³, нижнекембрийского горизонта несколько ниже – 0,9 м³/м³, а обводненных зон кимберлитовых трубок – до 0,2 м³/м³. Состав водорастворенных газов изменяется от преимущественно азотного до преимущественно углеводородного.

Формирование гидрогеохимического разреза региона обусловлено комплексом факторов. Из них главенствующую роль имели: преобладание карбонатных осадочных пород; наличие или отсутствие платов каменной соли; многофазовые этапы кимберлитового и траппового магматизма; неоднократная тектоническая активизация; широкое развитие разрывных нарушений, приведшее к значительной проницаемости осадочного чехла; криогенез системы подземные воды - горные породы (Геология, гидрогеология..., 1986; Алексеев, Пиннекер, 1997; Пиннекер и др., 1998). Обобщенная характеристика основных гидрогеохимических зон Западной Якутии представлена в табл. 4. Главные особенности вертикальной гидрогеохимической зональности выражаются в том, что для соленосных регионов Западной Якутии характерен двухзональный гидрогеохимический разрез, для несоленосных – однозональный. Хлоридные натриевые рассолы (рассолы выщелачивания) приурочены к верхним частям двухзонального разреза, причем положение северной границы их распространения принимается близкой к границе распространения каменной соли в разрезе нижнекембрийских отложений. Хлоридные кальциевые (метаморфизованные рассолы) залегают ниже рассолов выщелачивания и преобладают в объеме всех подземных вод, а в несоленосных регионах занимают осадочный чехол полностью, формируя однозональный гидрохимический разрез.

Равновесие в системе вода (рассол)-порода. Проблема генезиса крепких хлоридных кальциевых рассолов требует понимания причин взаимосвязи минерализации (солености) подземных вод и содержания составляющих компонентов раствора и, следовательно, определения степени насыщения подземных вод относительно водовмещающих пород, выяснения равновесно-неравновесного состояния системы, в которой происходят процессы взаимодействия подземных вод и пород и метаморфизации состава растворов.

На основе физико-химического моделирования равновесия в системе вода-порода с помощью программного комплекса HydroGeo (Букаты, 1997, 1999, 2002) и результатов экспериментальных исследований взаимодействия рассолов со льдом удалось раскрыть особенности протекания геохимических процессов в Оленёкском КАБ в условиях глубокого охлаждения геологического разреза в позднем кайнозое. Расчет равновесий подземных соленых вод и рассолов с основными минералами водовмещающих пород выполнен с использованием результатов химического анализа 110 проб подземных вод Оленекского КАБ, вскрытых в осадочных горных породах и кимберлитовых трубках на глубине 110-1750 м. При настройке модели в систему были включены основные ионы (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Sr^{2+} , Li^+ , Rb^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Br^-), ассоциаты (H_2CO_3 , Na_2SO_4 , $(\text{NaSO}_4)^-$, NaBr , NaCl , MgSO_4 , $\text{Mg}(\text{SO}_4)_2^{2-}$, MgBr_2 , MgCl^+ , MgCl_2 , $(\text{KSO}_4)^-$, K_2SO_4 , KBr , KCl , $(\text{Ca}(\text{SO}_4)_2)^{2-}$, CaSO_4 , CaBr_2 , CaCl^+ , CaCl_2 , HBr , SrCl^+ , SrCl_2) и породообразующие минералы, типичные для геологического разреза бассейна (кальцит, доломит, магнезит, стронцианит, ангидрит, гипс, целестин, галит). Расчет активностей компонентов, выполненный для

Таблица 4. Геохимические особенности подземных вод основных гидрохимических зон

Гидрохимическая зона	Мощность зоны, м	Состав подземных вод	Минерализация подземных вод, г/дм ³	pH	rCa/rMg	rNa/rCl	Cl/Br	Ca/Sr
Соленосный регион (Верхневиллюйский КАБ)								
Пресные подземные воды (в твердой фазе)	30-130	HCO ₃ , SO ₄ -HCO ₃ , Cl-HCO ₃ Ca-Mg, Mg-Ca	0,3-0,8	6,5-7,5	1,1-1,7	0,6-2,9	–	85-170
Солоноватые подземные воды (в твердой фазе)	50-150	SO ₄ , SO ₄ -Cl Na-Ca, Ca-Na	1,0-14,0	6,0-7,5	–	–	–	–
Солёные воды, слабые и крепкие рассолы	40-230	Cl Na	28-300	7,0-8,0	1,0-2,0	0,95-1,0	700-2000	40-120
Крепкие и весьма крепкие рассолы	100-1000 и более	Cl Ca, Mg-Ca, Na-Ca	170-445	3,0-5,0	2,0-10,0	0,1-0,3	40-80	40-80
Несоленосные регионы (Оленёкский и Средневиллюйский КАБ)								
Пресные подземные воды (в твердой фазе)	30-230	HCO ₃ , SO ₄ -HCO ₃ , Cl-HCO ₃ Ca-Mg, Mg-Ca	0,1-0,4	6,5-7,5	0,12-7,0	0,12-3,3	7-170	125-4666
Солоноватые подземные воды (в твердой фазе)	30-40	Cl Ca-Mg, Mg-Ca	1,0-12,4	6,0-7,5	0,2-1,8	0,08-0,62	39-380	108-1562
Солёные воды, слабые и крепкие рассолы	50-60	Cl Mg-Ca, Ca-Mg	31-252	5,0-7,0	0,7-2,1	0,1-0,4	40-80	16-185
Крепкие и весьма крепкие рассолы	2000	Cl Ca (Na-Ca, Mg-Na-Ca)	220-405	1,0-5,0	4,9-5,9	0,1-0,5	34-66	33-142

Примечание: прочерк – нет данных.

лабораторных и пластовых условий, не показал существенного различия степени и характера насыщения подземных вод относительно основных породообразующих минералов.

Результаты физико-химического моделирования свидетельствуют о том, что значительная часть рассолов верхнекембрийского водоносного комплекса по отношению к карбонатным минералам (кальциту, доломиту, магнезиту и стронцианиту) находится в состоянии, близком к равновесному (рис. 5).

Наименьшая степень насыщения характерна для слабых рассолов хлоридного Mg-Ca или Ca-Mg состава с минерализацией 54-57 г/дм³. Равновесное (или квазиравновесное) состояние подземных вод обусловлено, вероятно, процессами взаимодействия в системе вода-порода: растворения и переноса вещества в результате конвекции (при больших скоростях водообмена) или молекулярной диффузии (при малых скоростях движения воды или отсутствии движения) в открытой системе. С течением времени эти процессы приводили к последовательному изменению химического состава рассолов и его глубокой метаморфизации. Рассолы венд-среднекембрийских водоносных комплексов формируют область, значительно смещенную влево от линии насыщения карбонатными минералами – в поле недонасыщения. Этими минералами насыщена только некоторая часть кислых рассолов с минерализацией от 323 до 404 г/дм³ и pH от 3,7 до 4,8.

Относительно сульфатных минералов (гипса, ангидрита и целестина) подземные рассолы бассейна недонасыщены. Это предопределяется чрезвычайно малым (иногда нулевым) содержанием сульфат-иона, а также отсутствием сероводорода в составе крепких хлоридных кальциевых рассолов бассейна.

С хлоридами (галитом, сильвином, карналлитом, тахигидритом, бишофитом) равновесия подземных вод бассейна также не наблюдается, что закономерно, поскольку содержание натрия в рассолах, насыщающих преимущественно карбонатные отложения, невысокое - в среднем составляет 10-15 %-экв.

Исследование взаимодействия рассолов с подземными текстурообразующими льдами в пластовых условиях: $t = -3$ °C и $P = 2,5$ МПа показало, что образующиеся растворы - смеси рассолов с жидкой фазой, полученной при плавлении льда, - остаются в различной мере недонасыщенными по отношению к минералам вмещающих пород. В пластовых условиях взаимодействие контактирующих рассолов с подземными льдами приводит к плавлению льда и разбавлению растворов. При этом изменение химического состава вод не происходит, а также отсутствуют предпосылки вторичного минералообразования и ухудшения фильтрационно-емкостных свойств массива пород.

Изотопы в подземных соленых водах и рассолах. Исследования изотопного состава подземных вод, выполненные в пределах Сибирской платформы позволили установить особенности распределения *стабильных изотопов водорода и кислорода*. По значениям $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ все солёные подземные воды и рассолы разделены на 2 группы: 1) хлоридные натриевые с пониженным содержанием тяжелых изотопов, что свойственно поверхностным водам, 2) хлоридные кальциевые, обогащенные кислородом-18 (от -16,76 до +1,73 ‰) и дейтерием (от -194,9 до -30,62 ‰).

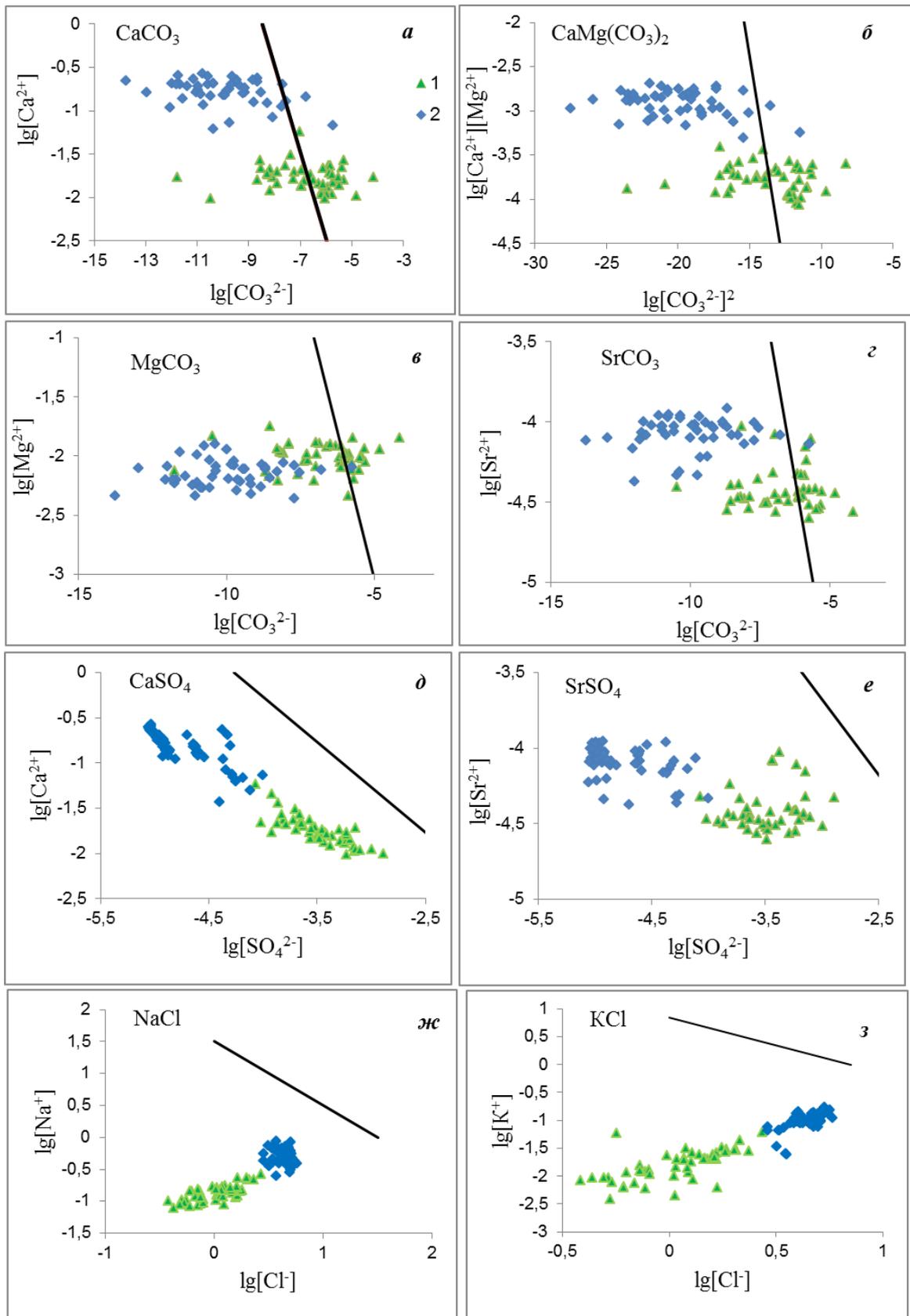


Рис. 5. Степень насыщения подземных вод Оленекского КАБ относительно карбонатных (*а* – кальцита, *б* – доломита, *в* – магнезита, *г* – стронцианита), сульфатных (*д* – ангидрита, *е* – целестина) и хлоридных (*ж* – галита, *з* – сильвина) минералов. Рассолы: 1 – первой гидрохимической зоны, 2 – второй гидрохимической зоны. Линии насыщения построены с использованием констант равновесия (Геологическая..., 2005, Крайнов и др., 2004; Jackson et al., 1987).

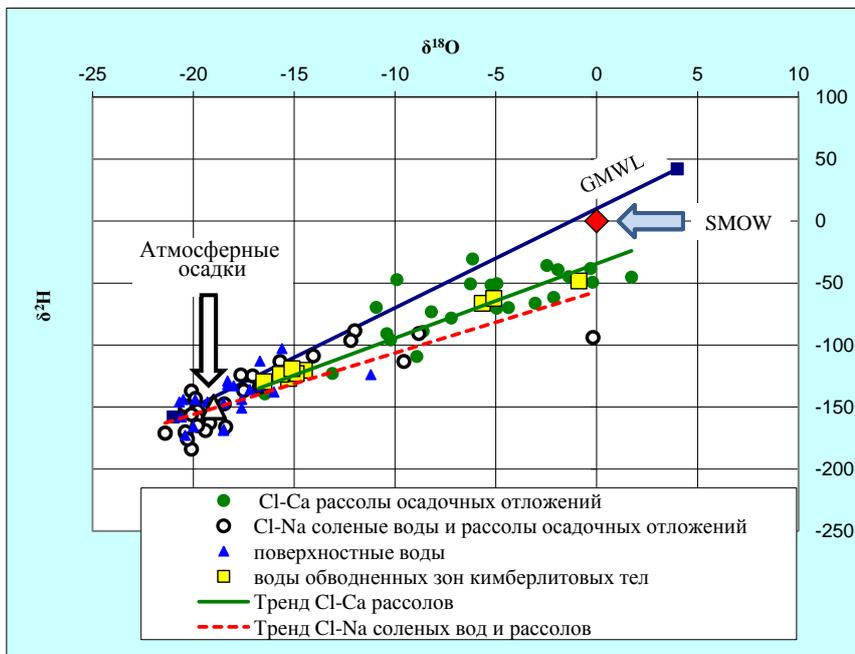


Рис. 6. Соотношение δ дейтерия и кислорода-18 в солёных водах и рассолах Сибирской платформы. GMWL – глобальная линия метеорных вод, SMOW – стандарт среднеокеанической воды.

до 22 и даже до 29. Тренды изотопного состава рассолов Сибирской платформы лежат несколько ниже и под углом к GMWL, т.е. хлоридные натриевые и кальциевые рассолы обеднены дейтерием и обогащены кислородом-18 по сравнению с метеорными и поверхностными водами (рис. 6).

Новые данные о содержании стабильных изотопов кислорода и водорода в подземных водах обводненных зон кимберлитов Западной Якутии хорошо укладываются в диапазон изменения $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ для солёных вод и рассолов Сибирской платформы. Три пробы подземных рассолов, отобранные из карьеров кимберлитовых трубок Удачная и Айхал, попадают точно на линию тренда хлоридных кальциевых рассолов, что, безусловно, свидетельствует в пользу седиментогенно-метаморфогенной гипотезы происхождения рассолов, насыщающих обводненные зоны кимберлитовых тел. Пробы подземных вод, отобранные из обводненных зон кимберлитовых трубок Новинка, Заполярная, Поисковая, Комсомольская-Магнитная и Нюрбинская тяготеют к группе солёных вод и рассолов с облегченным изотопным составом кислорода и водорода и одинаковым соотношением $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}=8$, которое характерно и для поверхностных вод. Это дает основание полагать, что метеорные воды участвовали в разбавлении седиментогенных вод до минерализации менее 100 г/дм^3 и в настоящее время являются главной составляющей рассолов кимберлитовых трубок.

Данные об изотопном составе хлора и брома в подземных водах и породах активно используются гидрогеологами для установления, например, гидравлической связи между отдельными частями геологического разреза, степени взаимодействия подземных вод с вмещающими породами, для определения источников повышенной минерализации подземных растворов. Существует Стандарт среднеокеанических хлоридов (SMOC - Standard Mean Ocean Chloride), значение $\delta^{37}\text{Cl}$ которого принимается за 0 ‰ (Kaufman et al., 1983). Для определения изотопов брома используется Стандарт среднеокеанических бромидов (SMOB - Standard Mean Ocean Bromide), предложенный британскими исследователями

Показано, что дифференциация геохимических типов вод обусловлена связью изотопного состава рассолов с их минерализацией и с глубиной их залегания. Существенное утяжеление изотопного состава хлоридных рассолов происходит при минерализации подземных вод более 300 г/дм^3 . Отношения $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ для солёных вод и слабых рассолов выщелачивания составляют 7-9, для крепких и весьма крепких рассолов (хлоридных кальциевых метаморфизованных) это отношение увеличивается

(Eggenkamp, Coleman, 2000). Относительно этих стандартов измеряется изотопное отношение $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ и $^{81}\text{Br}/^{79}\text{Br}$ соответственно для конкретного образца.

Исследование распределения изотопов хлора и брома в подземных водах Западной Якутии показало, что значения $\delta^{37}\text{Cl}$ в подземных солёных водах и рассолах колеблются в пределах $-0,527 \dots +1,302 \text{ ‰}$ (SMOC), что входит в диапазон значений для подземных вод различных регионов мира (рис. 7).

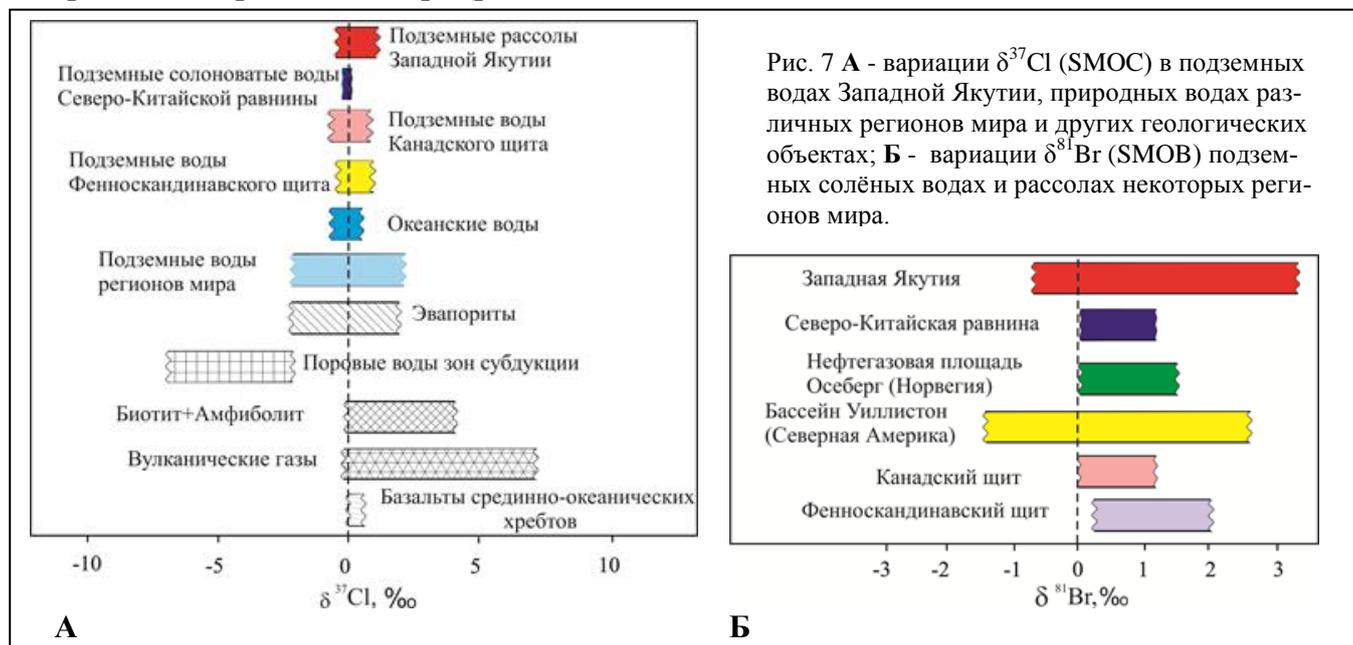


Рис. 7 А - вариации $\delta^{37}\text{Cl}$ (SMOC) в подземных водах Западной Якутии, природных водах различных регионов мира и других геологических объектах; Б - вариации $\delta^{81}\text{Br}$ (SMOB) подземных солёных водах и рассолах некоторых регионов мира.

Значения $\delta^{81}\text{Br}$ изменяются от $-0,8$ до $+2,31 \text{ ‰}$ (SMOB) и перекрывают эти величины в подземных водах кристаллических пород Канадского и Фенноскандинавского щита, однако очень близки к значениям $\delta^{81}\text{Br}$ в подземных водах осадочного бассейна Уиллистон (Северная Америка). Для подземных вод кимберлитов и осадочных отложений Западной Якутии характерна линейная зависимость между $\delta^{37}\text{Cl}$ и $\delta^{81}\text{Br}$ с высоким коэффициентом достоверности аппроксимации (0,8), что может указывать на единый источник поступления элементов в подземные воды и одинаковое влияние эволюционных геохимических процессов на преобразования состава подземных вод в системе вода-порода.

Анализ зависимости между а) концентрацией иона хлора и величиной $\delta^{37}\text{Cl}$ и б) содержанием Br и значением $\delta^{81}\text{Br}$ показывает, что все изученные подземные воды разделяются на две группы (рис. 8). Одна группа включает в основном глубокозалегающие хлоридные кальциевые рассолы с высокой минерализацией (до 600 г/дм^3). Они характеризуются высоким содержанием Cl-иона ($> 196 \text{ г/дм}^3$) и относительно узким диапазоном значений $\delta^{37}\text{Cl}$ (от $-0,527$ до $+0,044 \text{ ‰}$). Другая группа объединяет преимущественно слабые хлоридные кальциевые рассолы с минерализацией до 100 г/дм^3 . Для вод этой группы характерна низкая концентрация Cl ($< 70 \text{ г/дм}^3$) и гораздо больший разброс значений $\delta^{37}\text{Cl}$ (от $-0,398$ до $+1,302 \text{ ‰}$). Аналогичным образом изменяются и значения $\delta^{81}\text{Br}$, по которым подземные воды также разделяются на две группы. В группе высокоминерализованных рассолов содержание брома изменяется от 3094 до 5637 мг/дм^3 при небольшом диапазоне изменения значений $\delta^{81}\text{Br}$ ($-0,13 \dots +0,38 \text{ ‰}$); для группы слабых рассолов, куда входит и проба хлоридного натриевого рассола, содержание брома составляет $412\text{-}1458 \text{ мг/дм}^3$, а значения $\delta^{81}\text{Br}$ разбросаны от $-0,80$ до $+2,31 \text{ ‰}$.

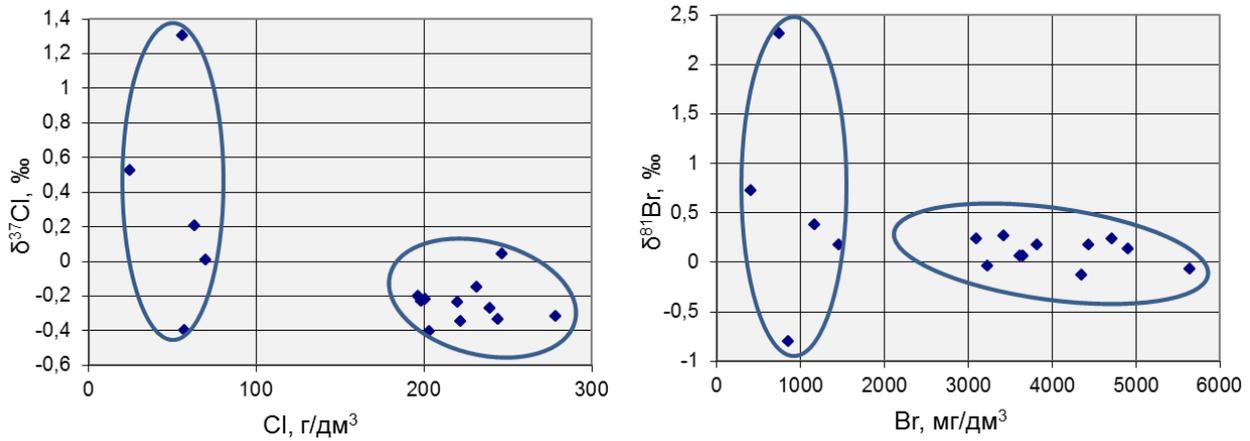


Рис. 8. Группы подземных соленых вод и рассолов кимберлитовых трубок и вмещающих пород по значениям $\delta^{37}\text{Cl}$ (а) и $\delta^{81}\text{Br}$ (б).

Из вышеизложенного следуют два важных вывода: 1) значения $\delta^{37}\text{Cl}$ и $\delta^{81}\text{Br}$ контролируются не только составом рассолов, но и их минерализацией, и 2) изотопное фракционирование Cl и Br в слабых и крепких рассолах происходит, по-видимому, под влиянием разных процессов. Более того, предварительные результаты исследований распределения и состава галогенных изотопов в подземных рассолах подтверждают инфильтрационную природу слабых и крепких рассолов Cl Na состава, а также седиментогенно-метаморфогенное происхождение слабых, крепких, весьма крепких и предельно насыщенных Cl Ca рассолов.

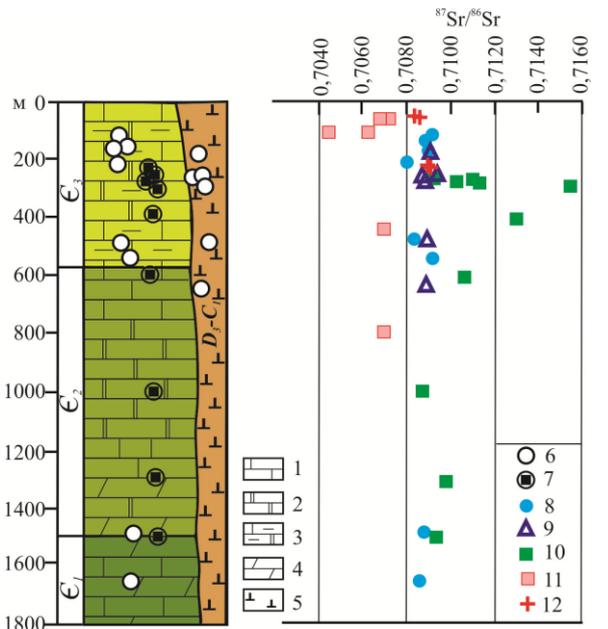


Рис. 9. Sr-изотопная характеристика геологического разреза Оленёкского АБ. 1 - известняки, 2 - доломиты, 3 – глинистые известняки и доломиты, 4 - алевролиты, мергели, 5 - кимберлиты; место отбора: 6 - проб воды, 7 - образцов пород; стронциевые отношения в: 8 - подземных водах осадочных отложений, 9 - подземных водах кимберлитовых трубок, 10 - осадочных отложениях, 11 – кимберлитах (Масловская, 1985), 12 – подземных текстурообразующих льдах.

Особенности изотопного отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в подземных рассолах отражают степень взаимодействия в системе вода-порода. Соотношение изотопов стронция изменяется только за счет ^{87}Sr – продукта радиоактивного распада рубидия-87 и пропорционально отношению Rb/Sr в каждой минеральной фазе (McNutt, 1990). При длительном взаимодействии рассолов с горными породами изотопное отношение стронция в водах стремится к отношению в исходной породе. В геохимии изотопов стронция установлен ряд реперных значений, в том числе для древней ювенильной воды (Вишневецкая и др., 2013) и современной морской воды (Lackschewitz et al, 2004). Изотопные отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в подземных водах осадочных отложений и кимберлитов Оленёкского АБ с минерализацией 40-397 г/дм³ попадают в достаточно узкий интервал: от 0,70803 до 0,70938 (рис. 9).

Самые низкие стронциевые отношения в подземных водах кембрийских карбонатных пород (0,70803) ближе всего к водам палеоокеана на рубеже венда и кембрия - 560-550 млн лет назад. Это подтверждает гипотезу о сингенетичности подземных вод вмещающим породам и о формировании рассолов в результате захоронения маточной рапы древних солеродных бассейнов. Однако подземные воды кимберлитовых трубок имеют более узкий диапазон стронциевых отношений и среднее значение (0,70898) ближе всего к значению в современной морской воде (0,70918). Объяснение этому можно найти в составе вмещающих пород, поскольку кимберлиты - это брекчированная ультраосновная порода, содержащая разнообразные и многочисленные инородные и сходные включения с различным составом стронция со значительными вариациями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - от 0,7042 до 0,7110. Следовательно, в подземных водах, насыщающих эти породы и взаимодействующих с ними, изотопный состав стронция мог изменяться в направлении как уменьшения, так и возрастания содержания радиогенного стронция в зависимости от источника его поступления в воду. Это может указывать на закрытость системы вода-порода, что также согласуется с гипотезой седиментогенно-метаморфогенного происхождения соленых вод и рассолов.

Формирование состава хлоридных кальциевых рассолов. Среди множества факторов (геологических, тектонических, геокриологических) формирования химического состава рассолов Западной Якутии первостепенное значение имеет геологическое строение разреза. Как уже было описано, в разрезе юго-западной (соленосной) части региона присутствуют мощные выдержанные пласты каменной соли, которые определяют развитие хлоридных натриевых рассолов выщелачивания. Для северо-восточной части (несоленосной) характерно обширное распространение преимущественно карбонатных отложений, включающих маломощные линзы гипсоносных или галогенных пород. Среди гидрогеохимических процессов, определяющих и контролируемых формирование состава подземных вод, ведущими можно назвать растворение и выщелачивание минералов галогенных формаций – для *инфильтрационных* хлоридных рассолов и испарительное концентрирование, захоронение в осадочных породах и последующие процессы метаморфизации состава древних растворов – для *седиментогенных* хлоридных рассолов.

Главная особенность гидрогеологического разреза региона в том, что здесь повсеместно и на всю мощность осадочного чехла (до глубины 2-3 км) распространены подземные воды единого химического типа – хлоридные солёные воды и рассолы. Гидрокарбонатные воды находятся в основном в твердой фазе, сульфатные (сульфатно-гидрокарбонатные, хлоридно-сульфатные) подземные солоноватые воды встречаются либо в виде текстурообразующих льдов, либо в виде межмерзлотных криопэггов. Вариации химического состава выражаются в изменении концентрации одного из трёх катионов: от абсолютного преобладания натрия до преимущественного содержания кальция; магний только в трети проб является преобладающим катионом, а чаще его концентрация сопоставима с содержанием кальция. Два основных подтипа подземных вод – хлоридный натриевый и хлоридный кальциевый – отличаются по происхождению, закономерностям распространения, содержанию микрокомпонентов. Базовые качественные признаки под-

типов определяются строением геологического разреза, а именно наличием или отсутствием галогенных толщ.

Сплошное распространение многолетнемерзлых пород в Западной Якутии определило ещё одну особенность гидрогеохимического разреза – наличие пресных и солоноватых подземных вод в твердой фазе. Они приурочены к гидродинамической зоне активного водообмена, которая полностью проморожена. Её нижняя граница примерно соответствует местным базисам эрозии. Первую гидродинамическую зону сменяет зона затрудненного водообмена, нижняя граница которой находится на глубине более 2000 м.

Особый интерес представляет установленное в Оленекском КАБ существенное недонасыщение крепких рассолов карбонатами. Неравновесность подземных вод с карбонатными минералами могла быть вызвана рядом причин. Например, изменением интенсивности водообмена, времени взаимодействия воды с горными породами, P–T-условий или какими-то локальными причинами (Геологическая..., 2005). При относительном постоянстве этих факторов в ходе геолого-геохимической эволюции бассейна степень равновесия крепких рассолов с карбонатами могла измениться и в результате разбавления рассолов солоноватыми или пресными подземными водами.

Между тем, начиная с плиоцена, подземные воды зоны активного водообмена в пределах Оленекского КАБ полностью проморожены. Горные породы, трещины и поры которых заполнены текстурообразующими льдами, слагают верхний ярус криолитозоны. Его подстилают охлажденные до $-3...0$ °С породы с напорными рассолами - криопэгами, образуя нижний ярус охлаждения. При таком строении мерзлотно-гидрогеологического разреза процесс разбавления рассолов, казалось бы, должен быть исключен.

Тем не менее, учитывая особую способность рассолов плавить лед при отрицательной температуре среды и высокую льдистость многолетнемерзлых пород, можно с уверенностью объяснить появление дополнительного объема воды, снижающего величину минерализации рассолов при переходе льда в жидкую фазу. Результатами взаимодействия рассолов со льдом при отрицательной температуре могут быть полное или частичное плавление льда, опреснение и стратификация жидкой фазы по плотности, образование «вторичного» солоноватого льда, восстановление проницаемости мерзлых литифицированных горных пород, формирование протяженных таликовых зон. В криоартезианских бассейнах Западной Якутии контактирование отрицательно-температурных хлоридных рассолов (криопэгов) с многолетнемерзлыми породами прослеживается повсеместно. При современных температурах мерзлой толщи (в среднем $-6...-2$ °С, максимально до -13 °С) криопэги не замерзают, поскольку температура кристаллизации растворенных в них солей NaCl и CaCl₂ составляет $-21,4$ и -55 °С соответственно. При отрицательной температуре, более высокой, чем температура замерзания рассола, на границе лед-рассол нарушается термодинамическое равновесие, возникает концентрационная диффузия растворенных солей, в результате чего лед плавится, а концентрация рассола уменьшается. Взаимодействие в системе лед-рассол сопровождается изменением объема при переходе твердой фазы в жидкую и разбавлением концентрированных растворов (Алексеев, 2009).

Дополнительным опреснителем мог служить и определенный объем связанной воды, находящейся в дисперсном заполнителе осадочных и магматических горных пород.

Связанная (незамерзшая) вода включает в себя воду, удерживаемую на минеральной поверхности частиц, и воду, присутствующую на поверхности льда. Известно, что прочносвязанная вода может находиться в жидком состоянии при отрицательной температуре, вплоть до $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Раковский и др., 1935). Однако при нарушении термодинамического равновесия в горном массиве и переходе температуры пород через значение температуры замерзания пленочной прочносвязанной воды возникает миграция незамерзшей воды под действием градиентов температуры, давления, электрического и других потенциалов (Основы геокриологии, 1995). Поступление новых порций маломинерализованных вод в более концентрированные растворы и могло привести к разбавлению последних, что, в свою очередь, изменило параметр насыщенности подземных рассолов относительно минералов вмещающих пород.

Таким образом, в масштабе геологического времени формирование состава хлоридных рассолов после захоронения маточной рапы в терригенно-карбонатной толще происходило в результате длительного взаимодействия с водовмещающими породами в условиях замедленного водообмена, палеозойско-мезозойской активизации с огромными масштабами кимберлитового и траппового магматизма, на которые накладывались процессы криогенеза при глобальном плиоцен-плейстоценовом похолодании климата. Но при всех природных сценариях первичные эвапоритовые ассоциации горных пород постоянно контролируют химический состав рассолов и определяют особенности геохимической эволюции системы вода-порода.

6. СОЛЁНЫЕ ВОДЫ И РАССОЛЫ КАК ГИДРОМИНЕРАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

Сибирская платформа содержит в своих недрах огромные ресурсы гидроминерального сырья. В хлоридных магниевых-кальциевых рассолах содержание лития, рубидия, стронция, брома и др. многократно превышает концентрации этих элементов в водах, что позволяет рассматривать минерализованные растворы как промышленное сырье. Требования к минимальным концентрациям в промышленных водах не являются постоянными и обусловлены во многом уровнем развития экономики, техники и технологии, потребления этих компонентов в различных отраслях хозяйства и конъюнктурой мирового рынка. В настоящее время минимальные концентрации ряда элементов, представляющих промышленный интерес (кондиционное содержание), составляют (мг/дм^3): литий – 10-20, рубидий – 3-5, стронций – 300, бром – 150-250, а реальное содержание этих компонентов в рассолах Сибирской платформы во много раз больше (табл. 5).

Диапазон содержания брома в подземных водах Западной Якутии при 100-процентной его встречаемости широк: от 60 мг/дм^3 до $6,8\text{ г/дм}^3$. Содержание брома в рассолах контролируется общей соленасыщенностью растворов, а зависимость содержания брома от минерализации подземных вод хорошо описывается полиномиальным уравнением ($\text{Br} = 1E-0,5M^2 + 0,0085M + 0,09$, где M – минерализация подземных вод) с коэффициентом достоверности аппроксимации 0,9. Наблюдается чётко выраженная положительная корреляция содержания брома и главных компонентов солёных вод и рассолов (хлоридов, кальция и магния).

Содержание лития в соленосных и подсолевых крепких рассолах Верхневиллюйского КАБ колеблется от 0,9 до 90,5 мг/дм³. Оно заметно увеличивается с ростом минерализации подземных вод, что характерно для крепких рассолов во всех рассматриваемых районах. Рост содержания лития при увеличении минерализации и уменьшении натрий-хлорного коэффициента подтверждает, что одним из путей его накопления следует считать процесс метаморфизации подземных вод в обстановке гидрогеологической закрытости.

Таблица 5. Содержание некоторых ценных компонентов в подземных водах в пределах Западной Якутии (М – минерализация воды).

Регион	Подземные воды	Содержание	Компонент				
			г/дм ³		мг/дм ³		
			М	Br ⁻	Li ⁺	Rb ⁺	Sr ²⁺
Верхневиллюйский КАБ	Соленосный водоносный комплекс (Є ₁)	Макс.	444,6	6,8	90,5	4,5	2549
		Мин.	169,8	2,0	5,8	1,1	362
		Среднее	404,0	5,9	39,1	3,6	1959
	Подсолевой водоносный комплекс (V-Є ₁)	Макс.	433,9	6,7	90,0	6,9	2900
		Мин.	169,8	0,9	0,9	0,1	1300
		Среднее	356,3	3,1	22,3	4,5	2200
Оленёкский КАБ	Водоносный комплекс (Є ₃)	Макс.	252,2	2,6	120,8	7,7	866
		Мин.	31,1	0,1	3,1	0,1	58
		Среднее	92,0	1,0	33,3	1,2	311
	Водоносные комплексы (V-Є ₂)	Макс.	411	6,5	415,3	46,4	2168
		Мин.	195,8	2,3	34,1	3,0	357
		Среднее	328,0	4,2	183,4	14,6	1192
	Дренажные воды карьера тр. Удачная	Макс.	396,7	5,2	299,8	32,5	1578
		Мин.	96,8	0,6	13,9	1,9	154
		Среднее	272,3	3,0	147,7	16,6	894

Содержание лития в соленых водах и рассолах верхнекембрийского водоносного комплекса Оленёкского КАБ изменяется в широких пределах - от 3 до 120,8 мг/дм³. В дренажных водах карьера тр. Удачная среднее содержание лития достигает 148 мг/дм³ (наибольшее зафиксированное 300 мг/дм³). Анализ зависимостей содержания лития от содержания макро- и микрокомпонентов состава подземных вод показал тесную взаимосвязь с катионами кальция, калия, магния и с анионами хлора и брома. Коэффициенты корреляции изменяются от 0,6 до 0,9.

Содержание рубидия в рассолах Западной Якутии изменяется от 0,1 до 7 мг/дм³ (Верхневиллюйский КАБ) и до 46,4 мг/дм³ (Оленёкский КАБ). Зависимость от минерализации подземных вод проявляется очень отчетливо – максимальная концентрация рубидия характерна для наиболее минерализованных (более 400 г/дм³) хлоридных магниевых кальциевых и кальциевых рассолов. А взаимосвязь рубидия с макро- и микрокомпонентами подземных рассолов слабая, коэффициенты корреляции составляют 0,4-0,6. Максимальное содержание рубидия (46 мг/дм³) зафиксировано в нижнекембрийских хлоридных кальциевых рассолах с минерализацией 407 г/дм³ на глубине 1480 м.

Содержание стронция в подземных рассолах Западной Якутии составляет от 58 до 3000 мг/дм³ при 100-% встречаемости (также как и брома), причем с ростом минерализации подземных вод растет и концентрация стронция в растворе. Максимальное содержа-

ние стронция зафиксировано в хлоридных натриево-кальциевых водах подсолевого водоносного комплекса Верхневилуйского КАБ. Парные взаимосвязи стронция с компонентами подземных вод также очень тесные с высокими коэффициентами корреляции ($K = 0,87-0,98$).

В Оленёкском КАБ высокая концентрация Sr характерна для хлоридных кальциевых рассолов средне-нижнекембрийских рифогенных карбонатных отложений. Это, вероятно, связано с тем, что породы карбонатных рифовых массивов, обогащенные стронцием, были основным поставщиком этого элемента в растворы в ходе геохимического взаимодействия первичных рассолов с вмещающим субстратом. Корреляционные связи между стронцием и макрокомпонентами рассолов (Sr-Na, Sr-K, Sr-Mg, Sr-Cl) хорошие – $K = 0,5-0,7$, а с кальцием стронций находится в строгой парагенетической ассоциации и коэффициент корреляции всегда больше 0,8.

Обработка крупнейших алмазных месторождений (трубки Удачная, Мир), которые находятся в пределах Оленёкского и Верхневилуйского КАБ, многие годы осложнена притоком хлоридных подземных рассолов. За время проведения горных работ общий объем откачанных дренажных вод превысил 27 млн м³ (карьер трубки Удачная) и 300 млн. м³ (карьер трубки Мир). Изоляция дренажных вод алмазодобывающих карьеров осуществляется посредством захоронения в многолетнемерзлые породы или в водоносные комплексы. Однако одним из способов утилизации дренажных вод может быть использование их в качестве сырья для совместного извлечения полезных компонентов, в том числе лития, рубидия, брома и стронция. Представление о количестве ценных продуктов, которые возможно получить из карьерных вод, можно составить на примере оценки дренажных рассолов карьера тр. Удачная как гидроминерального сырья.

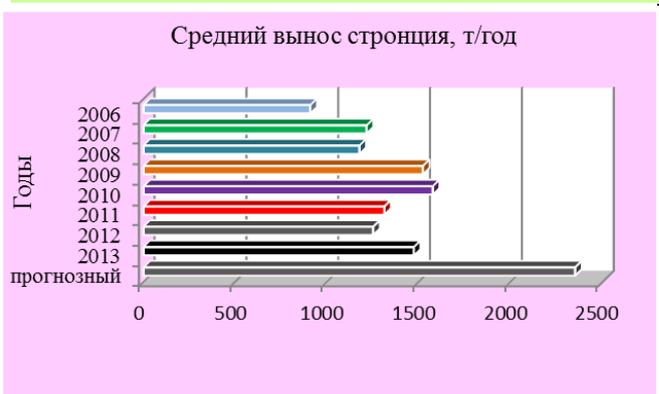
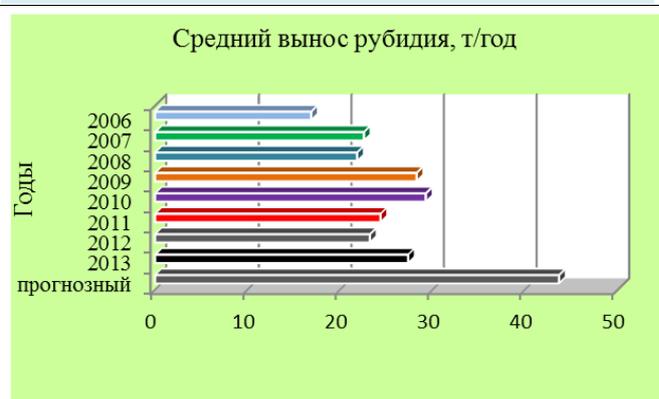
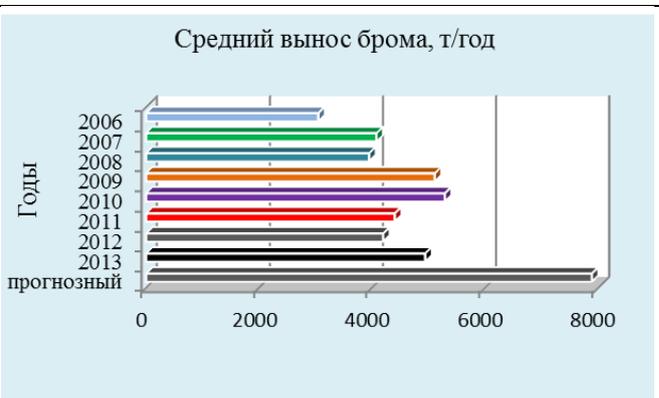
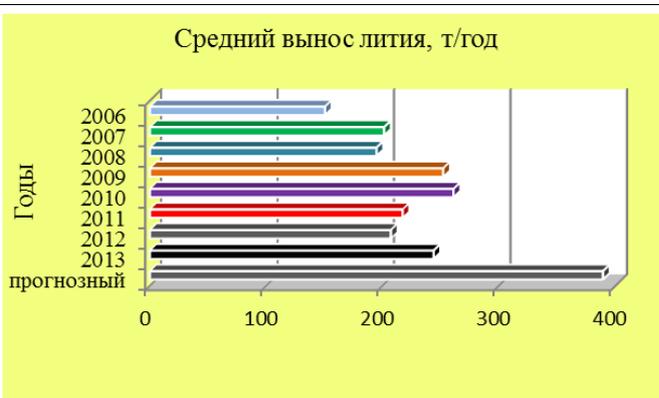
На основе данных о водопритоке дренажных вод в карьер трубки Удачная и содержании ценных компонентов в этих водах рассчитано количество лития, брома, рубидия и стронция, выносимое в горную выработку с рассолами за сутки. Для расчетов использованы материалы Удачинского ГОКа АК «АЛРОСА» (ПАО) и ИЗК СО РАН за период 2006-2014 гг. Этого достаточно, чтобы иметь представление о масштабах ежегодных потерь ценных компонентов с дренажными водами карьера. Расчеты показывают, что при средних концентрациях (в мг/дм³): лития - 148, брома – 3000, рубидия – 16,6 и стронция - 894 в дренажных водах и реальном водопритоке в карьер Удачный (табл. 6) с дренажными рассолами выносятся в среднем в год: до 250 т лития, около 5000 т брома, около 30 т рубидия, до 1500 т стронция, а при прогнозном увеличении водоприток до 300 м³/ч (7200 м³/сут.) среднее значение этих величин будет превышено в 1,5-2 раза. Их максимальные концентрации в дренажных водах уже сейчас обеспечивают вынос в год: более 400 т лития, более 7500 т брома, около 50 т рубидия и более 2000 т стронция.

Это колоссальное количество потерянных ценных компонентов убеждает в необходимости использования дренажных вод, являющихся ценнейшим гидроминеральным сырьём и неисчерпаемым источником химических товарных продуктов. Если оценить потери промышленных компонентов с начала осушения карьера (из расчета по их минимальной концентрации в дренажных водах), то при общем объеме (27217000 м³) отка-

чаных вод за период 1985-2014 гг. они составили: лития – более 380 т, брома – 16000 т, рубидия – около 52 т, стронция – более 4000 т.

Таблица 6. Вынос редких компонентов с дренажными рассолами в карьер трубки Удачная

Водоприток (м ³ /сут.)	Вынос лития (кг/сут.)		
	Мин.	Сред.	Макс.
2780 (2006 г.)	39	411	834
3720 (2007 г.)	52	547	1116
3600 (2008 г.)	50,4	540	1080
4660 (2009 г.)	65	690	1400
4824 (2010 г.)	67,5	714	1447
4015 (2011 г.)	56,1	593	1202
3828 (2012 г.)	53,6	567	1148
4507 (2013 г.)	63,1	667	1352
7200 (прогнозный)	100,8	1080	2160
Вынос брома (кг/сут.)			
2780 (2006 г.)	1668	8340	14456
3720 (2007 г.)	2232	11160	19344
3600 (2008 г.)	2160	10800	18720
4660 (2009 г.)	2796	13980	24232
4824 (2010 г.)	2894	14472	25085
4015 (2011 г.)	2405	12024	20842
3828 (2012 г.)	2297	11484	19906
4507 (2013 г.)	2704	13521	23436
7200 (прогнозный)	4320	21600	37440
Вынос рубидия (кг/сут.)			
2780 (2006 г.)	5,3	46,1	90,4
3720 (2007 г.)	7,1	61,8	120,9
3600 (2008 г.)	6,8	59,8	117,0
4660 (2009 г.)	8,9	77,4	151,5
4824 (2010 г.)	9,2	80,1	156,8
4015 (2011 г.)	7,6	66,5	130,3
3828 (2012 г.)	7,3	63,5	124,4
4507 (2013 г.)	8,6	74,8	146,5
7200 (прогнозный)	13,7	119,5	234,0
Вынос стронция (кг/сут.)			
2780 (2006 г.)	428	2485	4387
3720 (2007 г.)	573	3326	5870
3600 (2008 г.)	554	3218	5681
4660 (2009 г.)	718	4166	7353
4824 (2010 г.)	743	4313	7612
4015 (2011 г.)	617	3583	6325
3828 (2012 г.)	590	3422	6041
4507 (2013 г.)	694	4029	7112
7200 (прогнозный)	1109	6437	11362



Таким образом, ресурсы дренажных вод карьера кимберлитовой трубки Удачной, хотя и ниже запасов рассолов самостоятельных месторождений, все же являются приемлемой базой для организации добычи и комплексной переработки гидроминерального сырья.

Значение подземных соленых вод и рассолов региона определяется возможностью использования огромных, уникальных ресурсов редкометалльного сырья, своеобразной «жидкой руды» для целей извлечения ценных продуктов. *Промышленными* принято называть природные воды (подземные и поверхностные), содержащие такие концентрации элементов, которые обеспечивают в конкретных гидрогеологических условиях на данном уровне развития технологии экономически целесообразную их добычу и переработку (Крайнов и др., 2004).

Выявленные геохимические закономерности формирования и распространения рассолов и соленых вод Западной Якутии, подробно описанные в работе, позволяют выделить две области с различным типом разреза, которые отличаются степенью заполнения водовмещающих толщ промышленными рассолами и содержанием ценных компонентов. Для северо-восточной части исследуемой территории (Оленёкский КАБ) с однозональным типом гидрогеохимического разреза характерны исключительно хлоридные кальциевые (магниево-кальциевые) воды. Концентрация микрокомпонентов в них практически всегда во много раз превышает их кондиционные содержания для промышленных вод. Отсутствие соленосных водоупоров и интенсивная тектоническая раздробленность пород способствуют существованию в целом единой гидрогеодинамической системы, взаимосвязи этажно залегающих горизонтов, зон дробления, способных дренировать обширные блоки водовмещающих пород. Это важно для оценки притоков к водозаборам и эксплуатационных запасов промышленных вод, так как в добычу могут быть вовлечены рассолы из всей мощной (более 2000 м) зоны их распространения. Кроме того, отсутствие подземных вод иных геохимических типов и сплошной экран многолетнемерзлых пород, препятствующий инфильтрации поверхностных вод, исключают угрозу разубоживания кондиционных вод в процессе сработки запасов рассолоносных горизонтов. Подобные благоприятные условия для добычи промышленных рассолов за пределами бассейна не наблюдаются.

В южной части, в пределах Верхневилуйского КАБ с двухзональным гидрогеохимическим разрезом распространены хлоридные натриевые солёные воды и рассолы, которые вскрываются скважинами и образуют многочисленные источники, отчетливо приуроченные к области распространения соленосных отложений кембрийского возраста. Для них характерны невысокие концентрации микрокомпонентов и как гидроминеральное сырье они перспективны только на бром и стронций.

Рассматривая в целом хлоридные кальциевые рассолы, следует констатировать, что значительные содержания микрокомпонентов делают их чрезвычайно привлекательными в качестве *комплексного* гидроминерального сырья. Оценка только по осреднённым содержаниям полезных компонентов показывает многократное превышение кондиционных норм (рис. 10).

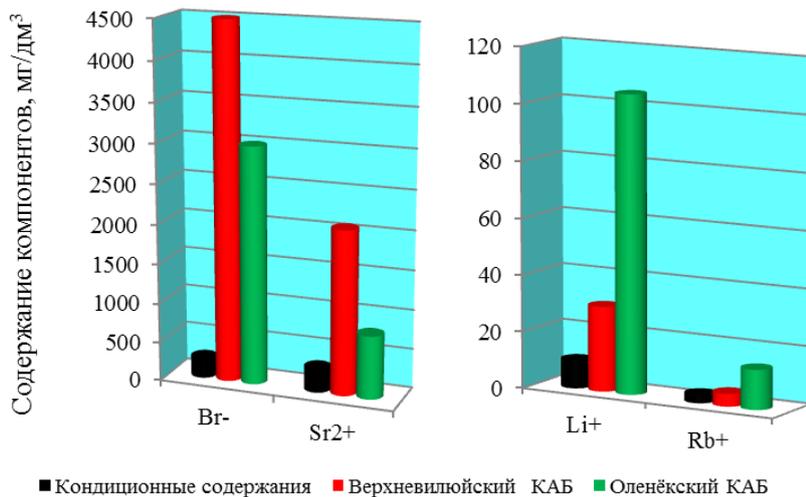


Рис. 10. Превышение среднего содержания ценных компонентов подземных рассолов Западной Якутии над их кондиционными концентрациями для промышленных вод.

Содержание лития, брома, рубидия, стронция в соленосных и подсолевых крепких рассолах Верхневилуйского КАБ заметно увеличивается с ростом минерализации подземных вод, что характерно для крепких рассолов Западной Якутии. Средние содержания ценных компонентов в рассолах превышают кондиционные концентрации брома – в 12-23 раза, лития – в 2-4 раза, стронция – в 6-7 раз.

В солёных водах и рассолах водоносных комплексов и обводненных зон кимберлитовых трубок и трапповых интрузий Оленёкского КАБ средняя концентрация лития более чем в 18 раз превышает его кондиционное содержание в промышленных водах. Среднее содержание брома в рассолах в 15 раз больше минимального промышленного содержания. Достаточно высокое среднее содержание стронция и рубидия также в 4-5 раз превышает кондиционные концентрации этих элементов.

В целом подземные воды Верхневилуйского КАБ характеризуются бóльшим содержанием брома и стронция, а для солёных вод и рассолов Оленёкского КАБ свойственно бóльшее содержание лития и рубидия. Концентрации ценных компонентов (брома, лития, стронция), выше средних значений, в том и другом районах, встречаются в 45-50 % проанализированных проб подземных вод (рубидия – в 12-18 % проб). А значит, потенциальная возможность использования солёных и рассольных вод в качестве промышленных вод для совместного извлечения редких элементов очень высока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, отражающие научную и практическую значимость выполненных исследований, сводятся к следующему.

1. Специфика геохимических особенностей подземных текстуробразующих льдов в осадочных и магматических породах Западной Якутии, вскрытых до глубины 250 м, является закономерным следствием эволюционных процессов взаимодействия в системе вода-порода, которые сопровождались растворением и переходом в раствор карбонатных, сульфатных и хлоридных солей до эпохи похолодания. Промерзание обводненного разреза приводило к формированию HCO_3 , $\text{HCO}_3\text{-Cl}$ и Cl , $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ и Cl-HCO_3 геохимических типов льдов. Источниками поступления сульфат- и хлор-ионов в подземные воды существовавшей до похолодания зоны активного водообмена являлись вмещающие горные породы.

Микрокомпонентный состав льдов отражает особенности первичного состава подземных вод, которые обогащались микрокомпонентами в процессе взаимодействия с кембрийскими глинисто-карбонатными породами или юрскими углистыми терригенно-осадочными отложениями. При промерзании геологического разреза в позднем кайнозое подземное льдообразование существенным образом трансформировало первичный состав растворов, переводя в межкристаллическое пространство твердой фазы часть накопленных микрокомпонентов. Для подземных льдов характерно высокое содержание Li, B, Si, Mn, Fe, Br, Sr при дефиците Sc, Ge, Hf, Ta, Nb, Th.

Распределение редкоземельных элементов в подземных льдах своеобразно и не наследует характер распределения РЗЭ ни во вмещающих породах, ни в океанских водах. Профиль распределения редкоземельных элементов в подземных льдах имеет характерную Λ -образную форму, ярко выраженную европиевую аномалию и примерно одинаковую долю лёгких и тяжелых РЗЭ. Концентрация РЗЭ в подземных льдах на 2-4 порядка ниже, чем в кимберлитах и осадочных породах, на 1-2 порядка превышает содержание РЗЭ в океанских водах.

2. Комплексное использование изотопных мультитрассеров ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{37}\text{Cl}$, $\delta^{81}\text{Br}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) для исследования проблемы генезиса и эволюционных процессов системы вода-порода позволяет привести больше доказательств происхождения высокоминерализованных хлоридных кальциевых рассолов в результате метаморфогенного преобразования захороненной седиментационной рапы.

Вариации $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ связаны с изменением минерализации подземных вод как осадочных отложений, так и обводнённых зон кимберлитов в направлении разделения всех вод на две группы: 1) слабые рассолы хлоридного натриевого и кальциевого состава с пониженным содержанием тяжелых изотопов, что свойственно поверхностным водам, и 2) крепкие хлоридные кальциевые рассолы, обогащённые тяжелыми изотопами ^{18}O и ^2H . Существенное утяжеление изотопного состава хлоридных рассолов происходит при минерализации подземных вод более 300 г/дм^3 , а также с увеличением глубины залегания водоносных комплексов.

Значения изотопов хлора и брома в подземных солёных водах и рассолах Западной Якутии перекрывают диапазон величин $\delta^{37}\text{Cl}$ и $\delta^{81}\text{Br}$ для кимберлитов и кристаллических пород щитов (Канадского, Фенноскандинавского), но совпадают с диапазоном для осадочных пород (например, бассейн Уиллистон, Северная Америка). Для подземных вод кимберлитов и осадочных отложений региона характерна линейная зависимость между $\delta^{37}\text{Cl}$ и $\delta^{81}\text{Br}$ с высоким коэффициентом достоверности аппроксимации (0,8), что может указывать на единый источник поступления элементов в подземные воды и одинаковое влияние эволюционных геохимических процессов на преобразования состава подземных вод в системе вода-порода.

Диапазон изменения стронциевого отношения в минерализованных подземных водах осадочных отложений и кимберлитов (от 0,70803 до 0,70938) попадает в диапазон изменения этого показателя в породах. К водам палеоокеана на рубеже венда и кембрия (560-550 млн лет назад) ближе всего стронциевые отношения в подземных водах кембрийских карбонатных пород, которые обогащались радиогенным стронцием в течение

длительного геологического времени, взаимодействуя с карбонатными вмещающими породами с повышенным значением $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Всё это указывает на закрытость системы вода-порода, подтверждает гипотезу о сингенетичности подземных вод вмещающим породам и о формировании рассолов в результате захоронения маточной рапы древних соленодных бассейнов.

3. На основе изучения степени подземных рассолов Оленёкского КАБ с основными минералами водовмещающих пород установлено, что крепкие хлоридные кальциевые рассолы в основном недонасыщены карбонатными, сульфатными и хлоридными минералами. Причина такой неравновесности подземных вод может быть связана с историей развития системы вода-порода в последние несколько миллионов лет, когда началось преобразование геологического разреза в результате глобального похолодания климата и формирования криолитозоны значительной мощности. Взаимодействие рассолов с текстурообразующими льдами приводило к плавлению льдов, высвобождению определенного объема пресной воды, которая смешиваясь с рассолами, снижала их соленость. Параметр насыщенности рассолов мог измениться и в результате миграции незамерзшей прочносвязанной воды в дисперсном заполнителе литифицированных горных пород.

4. В Западной Якутии в качестве гидроминерального сырья для добычи брома, лития, стронция, рубидия и других ценных компонентов могут рассматриваться не только подземные воды водоносных комплексов, обводненных зон кимберлитов, но и дренажные рассолы алмазодобывающих карьеров. Оценка по осредненным содержаниям полезных компонентов показывает многократное превышение кондиционных норм: брома – в 12-23 раза, лития – более чем в 18 раз, стронция – в 6-7 раз, рубидия - в 4-5 раз. Повсеместно распространённые поликомпонентные высокоминерализованные подземные воды в пределах Западной Якутии обладают гораздо бóльшим потенциалом для крупномасштабного долгосрочного производства ценных компонентов (соединений лития, брома, рубидия, стронция и др.), чем месторождения твердых полезных ископаемых. Комплексное безотходное освоение ресурсов подземных рассолов позволит решить проблему снижения себестоимости полученной товарной продукции и обеспечения потребностей промышленности страны в ценных компонентах.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

Маринов Н.А., Дзюба А.А., **Алексеева Л.П.** Использование подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения / Основы гидрогеологии. Использование и охрана подземных вод. – Новосибирск: Наука, **1983**. – С.15-33.

Пиннекер Е.В., **Алексеева Л.П.** Закономерности распространения и формирования подземных вод / Геология и сейсмичность зоны БАМ. Гидрогеология. – Новосибирск: Наука, **1984**. – С. 31-58.

Вахромеев А.Г., Алексеев С.В., **Алексеева Л.П.** Глава 1. Распространение и геохимия промышленных рассолов. Глава 2. Месторождения глубокозалегающих промышленных рассолов Сибирской платформы. Научно-прикладные аспекты изучения, оценки запасов и освоения // Промышленные рассолы Сибирской платформы: гидрогеология, бурение и добыча, переработка, утилизация / С.В. Алексеев, А.Г. Вахромеев, Н.П. Кочупало, А.Д. Рябцев. – Иркутск: Изд-во «Географ», **2014**. – 162 с.

Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК

1. Алексеев, С.В. Динамика состава дренажных вод при разработке алмазодобывающего карьера (Якутия) / С.В. Алексеев, **Л.П. Алексеева**, В.Н. Борисов // География и природные ресурсы. – 2000. - № 4 - С. 143-146.
2. Алексеев, С.В. Гидрогеохимия криолитозоны центральной части Якутской алмазодобывающей провинции / С.В. Алексеев, **Л.П. Алексеева** // Криосфера Земли. – 2000. – Т. IV, № 4. – С. 89-96.
3. Алексеев, С.В. Первый опыт захоронения соленых дренажных вод карьера трубки Удачная в многолетнемерзлые породы / С.В. Алексеев, А.В. Дроздов, Т.И. Дроздова, **Л.П. Алексеева** // Криосфера Земли. - 2002. – Т. VI, № 2. – С. 61-65.
4. Мельников, А.И. Оценка параметров техногенной активизации опасных геологических процессов в крупных горных выработках открытого типа (на примере карьера трубки Удачная) / А.И. Мельников, С.В. Алексеев, В.В. Ружич, К.Н. Егоров, **Л.П. Алексеева** и др. // Отечественная геология. – 2002. - № 5. – С. 20-24.
5. Alexeev, S.V. Ground ice in the sedimentary rocks and kimberlites of Yakutia, Russia / S.V. Alexeev, **L.P. Alexeeva** // Permafrost and Periglacial Processes. – 2002. – 13. – Pp. 53-59.
6. Alexeev, S.V. Hydrogeochemistry of the permafrost zone in the central part of the Yakutian diamond-bearing province, Russia / S.V. Alexeev, **L.P. Alexeeva** // Hydrogeology Journal. – 2003. - 11(5). – Pp. 574-581.
7. Алексеев, С.В. Изотопный состав (H, O, Cl, Sr) подземных рассолов Сибирской платформы / С.В. Алексеев, **Л.П. Алексеева**, В.Н. Борисов и др. // Геология и геофизика. - 2007. - Т. 48, № 3. - С. 291-304.
8. Shouakar-Stash, O. Geochemistry and stable isotopic signatures, including chlorine and bromine isotopes of the deep groundwaters, of the Siberian platform, Russia / O. Shouakar-Stash, S.V. Alexeev, S.K. Frapе, **L.P. Alexeeva** и др. // Applied Geochemistry. – 2007. – Vol. 22, Issue 3. – Pp. 589-605. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2006.12.005.
9. Алексеев, С.В. Прогноз формирования техногенного талика в многолетнемерзлых породах / С.В. Алексеев, В.И. Гунин, **Л.П. Алексеева**, Г.П. Шмаров // Горный журнал. – 2007. - № 12. – С. 36-39.
10. Алексеев, С.В. Литиеносные рассолы Далдыно-Алакитского района (Западная Якутия) / С.В. Алексеев, **Л.П. Алексеева** // География и природные ресурсы. – 2008. - № 2. - С. 103-108.
11. Алексеев, С.В. Перспективы эффективной эксплуатации бессточных хвостохранилищ Удачинского ГОКа АК «АЛРОСА» / С.В. Алексеев, **Л.П. Алексеева**, Г.П. Шмаров, А.М. Кононов // Горный журнал. – 2009. - № 6. – С. 53-56.
12. Chabaux, F. Geochemical and isotopic (Sr, U) variations of lake waters in the Ol'khon Region, Siberia, Russia: Origin and paleoenvironmental implications / F. Chabaux, M. Granet, Ph. Larque, J. Riotte, Eu. Skliarov, O. Skliarova, **L. Alexeieva**, F. Risacher // Comptes Rendus Geoscience. - 2011. - № 343. - Pp. 462-470.
13. Алексеев, С.В. Литиеносные подземные воды Иркутской области и Западной Якутии / С.В. Алексеев, **Л.П. Алексеева**, А.Г. Вахромеев, Г.П. Шмаров // Горный журнал. - 2012. - № 2. - С. 8-13.
14. Алексеев, С.В. Литиеносные подземные воды Иркутской области и Западной Якутии / С.В. Алексеев, **Л.П. Алексеева**, А.Г. Вахромеев, А.Г. Владимиров, Н.И. Волкова // Химия в интересах устойчивого развития. - 2012. - № 20. - С. 27-33.
15. Алексеев, С.В. Новые данные об изотопном составе (^{18}O и ^2H) подземных вод кимберлитовых полей (Западная Якутия) / С.В. Алексеев, **Л.П. Алексеева**, А.М. Кононов

// Известия Сибирского отделения секции наук о земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. - 2013.- № 2(43). С. 93-99.

16. Alexeev, S.V. New Opportunities to Effective Tailing Storage Operation (JSC «ALROSA», Russia) / S.V. Alexeev, **L.P. Alexeeva**, A.M. Kononov, G.P. Shmarov // Procedia Earth and Planetary Science. – 2013. - Vol. 7, pp. 10–13. DOI: 10.1016/j.proeps.2013.03.021.

17. **Алексеева, Л.П.** Геохимические особенности подземных текстурообразующих льдов алмазоносных районов Западной Якутии / Л.П. Алексеева, С.В. Алексеев, А.М. Кононов // Лед и снег. - 2014. - № 1(125). - С. 101-113.

18. **Алексеева, Л.П.** Изотопное стронциевое отношение ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) в подземных льдах и водах Оленёкского артезианского бассейна (Западная Якутия) / Л.П. Алексеева, С.В. Алексеев, А.М. Кононов // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. - 2014. - № 6(49). - С. 97-104.

19. **Алексеева, Л.П.** Изотопы хлора и брома в рассолах Западной Якутии / Л.П. Алексеева, С.В. Алексеев, А.М. Кононов, Ма Тенг, Лю Юньде. // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». - 2015. – Т. 13. - С. 19-30.

20. Васильчук Ю.К. Изотопный состав ледогрунтового ядра минеральных бугров пучения в долине реки Сенца, Восточный Саян / Ю.К. Васильчук, С.В. Алексеев, С.Г. Аржанников, **Л.П. Алексеева** и др. // Криосфера Земли. - 2015. – Т. XIX, № 2. - С. 52-66.

21. **Alexeeva, L.P.** Halogen Isotopes (^{37}Cl and ^{81}Br) in Brines of the Siberian Platform / L.P. Alexeeva, S.V. Alexeev, A.M. Kononov, Teng Ma, Yunde Liu // Procedia Earth and Planetary Science. – 2015. - Vol. 13. - Pp. 47-51. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.07.011.

22. Alexeev, S.V. Trace elements and rare earth elements in ground ice in kimberlites and sedimentary rocks of Western Yakutia / S.V. Alexeev, **L.P. Alexeeva**, A.M. Kononov // Cold Regions Science and Technology. – 2016. - Vol.123. - Pp. 140-148. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.10.008.

Публикации в других изданиях

1. **Alexeeva, L.P.** Problems of groundwater protection in permafrost region: An example of northern part of Baikal rift zone / L.P. Alexeeva // Proc. 8th Int. Congress Int. Assoc. of Eng. Geology. – Vancouver - Canada: Rotterdam. Balkema, 1998. – Pp. 2335-2337.

2. Пиннекер Е.В. Гидрогеология и гидрогеохимия центральной части Якутской алмазоносной провинции / Е.В. Пиннекер, С.В. Алексеев, **Л.П. Алексеева** // Проблемы региональной гидрогеологии (Седьмые Толстихинские чтения, 11-12 ноября 1998 г.). - Санкт-Петербург, 1998. - С. 32-36.

3. Алексеев, С.В. Криолитозона Далдыно-Алакитского района. Проблемы эволюции и освоения / С.В. Алексеев, **Л.П. Алексеева** // Закономерности строения и эволюции геосфер – Хабаровск, 1998. – С. 399-401.

4. Alexeev, S.V. Permafrost zone of Daldyn-Alakit region. The problems of evolution and development / S.V. Alexeev, **L.P. Alexeeva** // 28 Arctic Workshop. - Colorado. USA. - 1998. - Pp. 301-304.

5. Алексеев, С.В. Геохимия дренажных рассолов кимберлитовой трубки Удачная / С.В. Алексеев, В.Н. Борисов, **Л.П. Алексеева**, М.Б. Букаты // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже III тысячелетия. – Томск, ТПУ, 2000. – С. 575-579.

6. Pinneker, E.V. Hydrogeology and Hydrogeochemistry of permafrost zone of Daldyn-Alakit region (Western Yakutia) / Pinneker E.V., Alexeev S.V. & **Alexeeva L.P.** // 30 Arctic Workshop - Colorado - USA, 2000. - Pp. 134-136. (<http://instaar.colorado.edu/AW2000>).

7. Alexeev, S.V. Dynamics of drainage water composition during development of diamond mining quarries (Western Yakutia, Russia) / Alexeev S.V., **Alexeeva L.P.** // 30 Arctic Workshop – Colorado - USA, 2000 – pp. 2-5. (<http://instaar.colorado.edu/AW2000>).

8. Алексеев, С.В. Геокриологическая и гидрогеохимическая оценки состояния массива пород в условиях захоронения техногенных вод карьера трубки Удачная / С.В. Алексеев, В.А. Павлов, **Л.П. Алексеева**, Т.И. Дроздова // Современные проблемы гидрогеологии и гидрогеомеханики (28 февраля-2 марта 2002 г.). – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2002. – С. 30-39.

9. Alexeev, S.V. The first experience of saline drainage water disposal from Udachnaya pipe quarry into permafrost / S.V. Alexeev, A.V. Drozdov, **L.P. Alexeeva**, T.I. Drozdova // 32 Arctic Workshop (Colorado, USA), 2002 – Pp. 4-7.

10. Alexeev, S.V. The Peculiarities of Utilization of the Technogenic Waste into Permafrost / S.V. Alexeev, **L.P. Alexeeva** // Proc. of 11th Int. Conf. on Cold Regions Engineering (20-22 May, 2002). – Anchorage. – Alaska. - USA, 2002. – Pp. 948-953.

11. Shouakar-Stash, O. Geochemistry and stable isotopic signatures of deep groundwaters and brine from the permafrost zone of the Siberian platform, Russia / O. Shouakar-Stash, S.V. Alexeev Sh., Frape, **L.P. Alexeeva**, E.V. Pinneker // GSA Annual Meeting “Science at highest level”. – Denver. – Colorado. – USA, 2002. – Pp. 218-224.

12. Alexeev, S.V. The burial of drainage waters of Udachnaya kimberlite pipe into permafrost / S.V. Alexeev, **L.P. Alexeeva** // Permafrost. Vol. 1. – Swets@Zeitlinger, Liss, Netherlands. - 2003. – Pp. 1-4.

13. Алексеев, С.В. Итоги и перспективы захоронения дренажных вод кимберлитовой трубки Удачная в мерзлых породах / С.В. Алексеев, **Л.П. Алексеева** // Итоги геокриологических исследований в Якутии в XX веке и перспективы их дальнейшего развития. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2003 - С. 67-78.

14. Alexeev, S.V. The burial of drainage waters of Udachnaya kimberlite pipe into permafrost / S.V. Alexeev, **L.P. Alexeeva** // Proc. of 8th International Conference on Permafrost. - Zurich. - Switzerland. - 2003. - Vol. 1. - P. 1-4.

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

16. Alexeev, S.V. Geochemical and isotope features of brines of the Siberian platform / S.V. Alexeev, **L.P. Alexeeva**, O. Shouakar-Stash, S.K. Frape // Proc. WRI-11 Intern. Symposium (27 June-2 July 2004, Saratoga Springs, NY, USA). - Rotterdam. Balkema, 2004. – P. 333-336.

17. Alexeev, S.V. Permafrost and cryopegs of the Anabar shield / S.V. Alexeev, **L.P. Alexeeva**, А.М. Кононов // Proc. of the 9th Int. Conf. on Permafrost. – Fairbanks. Alaska. USA. - 2008. – Pp. 31-35.

18. Alexeev, S.V. Cryopegs of the Yakutian diamond-bearing province (RUSSIA) / S.V. Alexeev, **L.P. Alexeeva**, А.М. Кононов // Proc. of the XXXVIII IAH Congress «Groundwater Quality Sustainability». – Krakow. Poland. University of Silesia, 2010. – P. 353-354.

19. Алексеев, С.В. Литиеносные подземные воды Сибирской платформы / С.В. Алексеев, **Л.П. Алексеева**, А.Г. Вахромеев // Мат-лы Всеросс. науч.-практ. совещ. с междунар. участием «Литий России» (24-26 мая 2011 г.). - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – С. 7-13.

20. Алексеев, С.В. Влияние подземного захоронения дренажных вод карьера трубки Удачная на состояние криолитозоны в пределах Кийенгского полигона / С.В. Алексеев, **Л.П. Алексеева**, А.М. Кононов, Г.П. Шмаров // Мат-лы Междунар. науч.-практ. конфер. «Проблемы и пути эффективной отработки алмазонасных месторождений» (Мирный, 11-15 апреля 2011 г.). - Мирный: Мирнинская городская типография, 2011. - С. 194.

21. Alexeev, Sergey V. Cryopegs in the Yakutian diamond-bearing province (Russia) / Sergey V. Alexeev, **Ludmila P. Alexeeva**, Alexander M. Kononov / Groundwater quality sustainability/ Ed. P. Maloszewski, S. Witczak & G. Malina. CRC Press/ Balkema. 2012. 101-107 pp.

22. Шварцев, С.Л. Перспективы использования промышленных рассолов Сибирской платформы для извлечения лития и брома / С.Л. Шварцев, С.В. Алексеев, А.Г. Вахромеев, **Л.П. Алексеева** / Интерэкспо Гео-Сибирь 2012: VIII Междунар. конфер. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых» (Новосибирск, 10-20 апреля 2012 г.).- Новосибирск: СГГА, 2012. - Т. 2. - С. 29-32.

23. **Алексеева, Л.П.** Гидроминеральные ресурсы Сибирской платформы на основе новейших данных / Л.П. Алексеева, С.В. Алексеев, А.Г. Вахромеев, С.Л. Шварцев / Гидрогеология сегодня и завтра: наука, образование, практика. Междунар. науч. конфер. МАКС Пресс, 2013. С. 52-59.

24. **Alexeeva, L.** Siberian Platform hydromineral resources: an updated analysis / L. Alexeeva, S. Alexeev, A. Vakhromeev // MinWat-14, Mineral waters: Genesis, Exploitation, Protection and Valorization. Karlovy Vary, Czech Republic. 8-11 September 2014. – Vol. abstr. – Pp. 14-15.

25. **Алексеева, Л.П.** Новые данные о стабильных изотопах хлора и брома в подземных водах Сибирской платформы / Л.П. Алексеева, С.В. Алексеев, А.М. Кононов, Тенг Ма, Юньде Лю // Мат-лы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XXI совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с междунар. участием, 22-28 июня 2015 г.) «Фундаментальные и прикладные проблемы гидрогеологии». - Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2015. - С. 240-244.

26. Алексеев, С.В. Новые данные о геохимии стабильных изотопах в рассолах Сибирской платформы / С.В. Алексеев, **Л.П. Алексеева**, А.М. Кононов // Мат-лы Всерос. конфер. с междунар. участием «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами». - Владивосток: Изд-во Дальнаука, 2015. - С. 60-64.

27. Алексеев, С.В. Равновесие хлоридных кальциевых рассолов Оленёкского криоартезианского бассейна с основными породообразующими минералами / С.В. Алексеев, **Л.П. Алексеева**, С.Л. Шварцев, Н.С. Трифонов, Е.С. Сидкина // Мат-лы Всерос. науч. конфер. с междунар. участием «Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Евразии». Томск: изд-во ТПУ, 2015. – С.114-123.