

На правах рукописи



Бутаков Владислав Игоревич

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКОГО
СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДОВ КАРСКОГО РЕГИОНА**

Специальность 1.6.7. Инженерная геология, мерзотоведение и
грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Тюмень
2022

Работа выполнена в Институте криосферы Земли – обособленном структурном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук (ИКЗ ТюмНЦ СО РАН)

**Научный
руководитель:**

Слагода Елена Адольфовна, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, ФГБУН Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН

**Официальные
оппоненты:**

Брушков Анатолий Викторович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой, ФГБОУ ВО МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

Надежда Анатольевна Павлова, кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией, ФГБУН Институт Мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск

Ведущая организация:

ФГБУ ВНИИОкеангеология,
г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «31» мая 2022 г. в 14⁰⁰ ч. на заседании диссертационного совета 24.1.062.01 при ФГБУН Институте земной коры СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИИЦ СО РАН (г. Иркутск, ул. Лермонтова, д.128) и на сайте:

<http://www.crust.irk.ru/images/upload/newsfull206/3021.pdf>

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по указанному адресу ученому секретарю диссертационного совета к.г.-м.н. Бабичевой Виктории Аркадьевне.

Тел.: 89148816658, факс: (3952)42-69-00, e-mail: khak@crust.irk.ru

Автореферат разослан « » апреля 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, кандидат геол.-мин. наук



В.А. Бабичева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Формирование подземных льдов представляет фундаментальную проблему мерзлотоведения, которая до настоящего времени остается дискуссионной. Химический состав подземных и поверхностных льдов важнейший показатель природных условий их формирования.

Актуальность работы.

Особенности геохимического состава подземных льдов являются показателями источников вод и условий формирования льдов и отложений. Установленные закономерности ионного состава подземных льдов не всегда позволяют определить источники поступления воды и других компонентов. Состав и содержание микроэлементов в подземных льдах также содержат информацию об условиях и процессах, участии атмосферного переноса аэрозолей, загрязняющих веществ, которые сопровождали формирование и преобразование льда. Сведения о микроэлементном составе подземных льдов Карского региона в публикациях немногочисленны, иногда несопоставимы. Таяние подземных льдов под воздействием современных изменений климата может привести к изменению геохимической обстановки в поверхностных и подземных водах. Достоверные представления о содержании микроэлементов во льдах могут быть использованы для оценки последствий интенсивного освоения Арктической зоны России.

Результаты исследований вошли в отчёты по проектам РФФИ №№ 18-35-00031 мол_а, 18-05-00376 А, 18-05-60222 Арктика, 18-55-11005 АФ_t; в рамках темы госзадания Рег.№ НИОКТР АААА-А17-117051850062-6.

Объектом научного исследования являются подземные льды и вмещающие отложения верхней части мерзлых пород Карского региона.

Цель работы: установить взаимосвязи химического состава, миграции и взаимодействия микроэлементов при формировании подземных льдов в зависимости от природных условий и типа промерзания.

Для достижения цели поставлены **задачи:**

1. Изучить существующие представления о формировании ионного и микроэлементного состава подземных льдов и разработать алгоритм обработки результатов химических анализов подземных льдов.
2. Установить химический состав отложений, вмещающих полигонально-жильные льды и пластовые льды на ключевых участках Карского региона.
3. Установить ионный и микроэлементный состав полигонально-жильных, пластовых и текстурообразующих льдов; провести расчет геохимических показателей, обусловленных источником вод и механизмом льдообразования.
4. Выявить влияние типа льдовыведения на формирование химического состава различных генетических типов льда и составить базу данных микроэлементного состава подземных льдов Карского региона.

Фактический материал и вклад автора. В экспедициях 2016-2018 гг. собраны образцы льда, воды и пород на п-ве Гыдан, Пур-Тазовском междуречье. Автором определен ионный состав 44 проб льда, поверхностных вод и водных вытяжек из пород с п-ва Гыдан и Пур-Тазовского междуречья в лабораториях Тюменского индустриального университета и ООО

«ТюменьПромИзыскания». Для исследований ИКЗ ТюмНЦ СО РАН предоставлены результаты геохимических анализов 93 проб подземных льдов и 12 проб пород: 32 – полигонально-жильного, 27 – пластового, 7 – клиновидного, 11 – текстурообразующего, 15 – озерного и прибрежно-морского, 1 – фирнового; 3 – пробы поверхностных вод, отобранных в Карском регионе в период 2008–2019 гг. Собрана база данных геохимического состава подземных льдов Карского региона. Автором разработан алгоритм обработки количественных характеристик ионного и микроэлементного состава «Geochem Anomaly» и выявлены особенности химического состава и закономерности распределения редкоземельных элементов в разных типах подземного льда.

Методы исследования. Для диагностики механизмов и условий льдообразования использован сравнительный анализ химического состава различных генетических типов подземных и поверхностных льдов между собой и с кларковыми значениями элементов. Микроэлементный состав определен из профильтрованных через поликарбонатные фильтры (0,45 мкм) расплавов монолитов льда в Лаборатории гидрохимии и химии атмосферы Лимнологического института СО РАН на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500se. Для выявления геохимических различий проведен парный корреляционный анализ элементов; изучено распределение лантаноидов с использованием цериевой, европиевой аномалий и отношения легких и тяжелых лантаноидов. Проведено сопоставление опубликованных и авторских материалов ионного и микроэлементного состава подземных льдов Западной и Восточной Сибири.

Основные защищаемые положения:

1. Химический состав полигонально-жильных льдов Карского региона определяется широким комплексом факторов, обусловленных природной обстановкой, условиями формирования и составом вмещающих отложений. В их число входят морские и континентальные аэрозоли, а также надмерзлотные и поверхностные воды. Поступление атмосферных осадков с морскими аэрозолями или надмерзлотных вод фиксирует отрицательная цериевая аномалия. Показателем участия надмерзлотных и поверхностных вод является положительная европиевая аномалия.

2. Пластовые льды Западного Ямала и Севера Гыдана отличаются большими вариациями концентраций ионов и микроэлементов по вертикали и латерали, что обусловлено условиями льдообразования. По содержанию и корреляциям ионов и аномалиям лантаноидов наблюдается сходство состава пластовых льдов и водорастворимых солей в отложениях, что подтверждает их внутригрунтовый генезис. Особенности химического состава унаследованы пластовыми льдами от вмещающих отложений при их формировании, что отражено в повышенной концентрации ионов и микроэлементов на контакте лед – порода за счет миграции влаги.

3. Установлены различия в распределении ионов и микроэлементов в разных типах льда: полигонально-жильных, пластовых, прибрежно-морских, озерного и ледникового льдах. Пластовые льды Западного Ямала отличаются

значительно более высокими концентрациями ионов и микроэлементов, чем ледниковый лед Полярного Урала, что подтверждает их внутригрунтовой генезис.

Новизна. 1. Авторский комплекс программ для обработки данных ионного и микроэлементного состава льда и воды; водорастворимых, подвижных, валовых форм элементов позволяет выявлять аномалии и особенности распределения микроэлементов в составе льдов на основе статистических параметров и парного корреляционно-регрессивного анализа. Впервые с применением программного комплекса собрана база данных ионного и микроэлементного состава подземных льдов Карского региона; проведено сравнение и нормализация данных по значениям кларков, содержанию редкоземельных элементов в стандартном сланце.

2. Выявлены различия содержания микроэлементов и распределений лантаноидов в полигонально-жильных льдах в зависимости от источников поступления компонентов – морских или континентальных аэрозолей и вмещающих отложений.

3. Впервые установлены различия в ионном и микроэлементном составе пластовых льдов в зависимости от типа льдообразования и источника вод.

Практическая значимость. Химический состав подземных льдов может служить критерием при реконструкциях палеогеокриологических условий региона. Применение особенностей распределения микроэлементов во льду в составе комплексного криолитологического анализа позволяет более точно различать генетические типы льда. Сведения о миграции и накоплении химических элементов в области распространения мерзлых пород необходимы для прогнозов загрязнения литосферы при ее хозяйственном освоении. Методы и опубликованные геохимические особенности льдов могут быть использованы для подготовки специалистов геологического и геохимического направлений. Разработанный программный комплекс позволяет проводить анализ результатов ионного и элементного состава воды и пород для выявления геохимических аномалий и техногенной нагрузки.

Достоверность результатов исследования обеспечивается единообразной методикой отбора и анализа проб льда, а также представительностью и достаточным количеством анализируемых образцов для статистической обработки.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований, положенные в основу диссертационной работы, были обсуждены на 6 российских и 5 международных конференциях: «Строение литосферы и геодинамика» (Иркутск, 2021); «Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне» (Якутск, 2020); «АРКТИКА: современные подходы к производственной и экологической безопасности в нефтегазовом секторе» (Тюмень, 2019); «Взаимодействие элементов природной среды в высокоширотных условиях» (Сочи, 2019)»; «НЕФТЬ И ГАЗ: технологии и инновации» (Тюмень, 2019); «Проблемы развития газовой промышленности» (Тюмень, 2018); «Криосфера Земли: прошлое, настоящее и будущее» (Пушино, 2017); XI Международный симпозиум по проблемам инженерного

мерзлотоведения (Магадан, 2017); The 2nd Asian Conference on Permafrost (Саппоро, Япония, 2017); «Научная и производственная деятельность – средство формирования среды обитания человечества» (Тюмень, 2017).

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 16 статьях и тезисах, из них 5 статей – в изданиях из перечня ВАК.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, состоящего из 132 источника, из них 17 – иностранные и приложения. Работа изложена на 120 страницах, включая 2 таблицы, 46 рисунков.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю доктору геолого-минералогических наук Елене Адольфовне Слагоде за предоставление материалов для исследований, совместное обсуждение и помощь на всех этапах выполнения работы. Автор благодарит д.г.н. В.В. Рогова и к.г.-м.н. А.Н. Курчатову за помощь в работе. Автор выражает признательность за сотрудничество к.г.-м.н. Я.В. Тихонравовой, к.г.-м.н. О.Л. Опокиной; сотрудникам Лаборатории гидрохимии и химии атмосферы Лимнологического института СО РАН к.х.н. И.В. Томберг и Н.А. Жученко за аналитические исследования; Газизовой Е.С., заведующей аналитической лабораторией ТИУ, за возможность проведения исследований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. История изучения химического состава льдов, ключевые участки и методы исследований

В разделе 1.1 дано описание истории изучения химического состава льдов и взаимосвязи химического состава воды и генетических типов льда с условиями промерзания. Лед, заключенный в мерзлых горных породах, называется подземным льдом (по В.И. Вернадскому). Компонентами льда являются минеральные растворимые и нерастворимые примеси, органические вещества, растворенные газы. Наличие этих компонентов в водном растворе обусловлено рядом протекающих в разных природных условиях физико-химических, криогенных, геологических и биологических процессов. Химический состав природных льдов использован как показатель условий льдообразования Н.И. Толстихиным, Н.П. Анисимовой, Б.И. Втюриным, Л.Н. Крицук, И.Д. Стрелецкой, М.О. Лейбман и другими. Представления о преобразовании исходного состава воды при формировании льдов разработаны З.А. Нересовой, В.П. Волковой, Н.Н. Романовским, Б.А. Савельевым, Н.П. Анисимовой, А.В. Ивановым и др.

Данные о распределении микроэлементов в подземных льдах в публикациях немногочисленны. С.В. Алексеевым и Л.П. Алексеевой изучен состав микроэлементов текстурообразующих льдов алмазоносных районов Западной Якутии. Геохимические особенности текстурообразующих льдов обусловлены процессами взаимодействия в системе вода – порода, происшедшими при формировании мерзлой толщи. В.В. Ивановой изучены содержания редкоземельных элементов в пластовых льдах о. Новая Сибирь и сделан вывод о сегрегационном и инъекционном генезисе пластовых льдов.

Ю.К. Васильчуком, Н.А. Буданцевой, Д.Ю. Васильчук в полигонально-жильных льдах Якутии установлены содержания некоторых микроэлементов (Sr, Mn, Zn, Cu, Fe, Co), а в составе полигонально-жильных льдов Ямала - содержания (Fe, Zn, Cu, Mn). Повышенные содержания элементов связывают с участием в формировании льда почвенных растворов и болотных вод.

Подземные льды обладают определенным запасом информации за геологически продолжительный период времени, что позволяет определить естественный геохимический фон и его эволюцию в плейстоцене и голоцене.

В разделе 1.2 Дано описание методов геокриологических исследований разрезов на ключевых участках и лабораторных исследований. Климатические условия арктической зоны севера Западной и Средней Сибири характеризуются продолжительной холодной зимой и коротким прохладным летом, что обеспечивает сплошное распространение многолетнемерзлых пород и подземных льдов. Исследования химического состава проведены для льдов ключевых участков в зонах арктической, типичной и южной тундры (рис. 1).

Изучение разрезов четвертичных льдистых толщ включало в себя: описание литологических и морфологических особенностей; определение физических и химических характеристик пород; отбор монолитов льда, изучение его структурно-текстурных особенностей, химический анализ.

Монолиты льда были сохранены в мёрзлом состоянии до проведения анализов. В лабораторных условиях монолиты льда были зачищены, разрезаны на части в зависимости от количества минеральных частиц, расплавлены и профильтрованы через поликарбонатные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм.

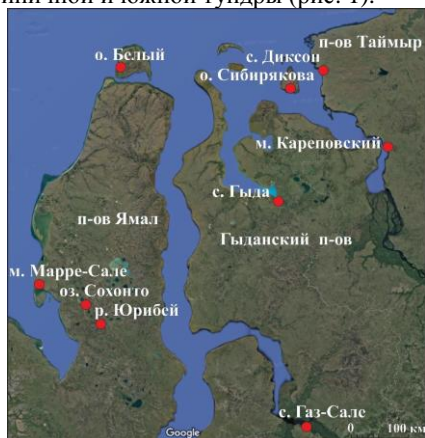


Рис. 1. Расположение ключевых участков исследований льдов, мерзлых пород и природных вод (www.google.ru/maps)

В разделе 1.3 описаны методы, апробация и интерпретация результатов математической обработки базы геохимических данных. На основе количественных характеристик химического состава составлена база данных ионного и элементного состава льдов. Разработан алгоритм анализа результатов исследований химического состава «Geochem Anomaly» на базе MS Excel (рис. 2). Результаты интерпретированы с помощью статистических методов. Для оценки минерализации льдов использована классификация Ю. К. Васильчука. Дана классификация ионного состава расплавов льдов, рассмотрены значимые геохимические показатели: I/Cl, Br/Cl, Fe/Ni, Fe/Co и оценены распределения содержаний лантаноидов по величине цериевой (Ce_{an}), европиевой (Eu_{an}) аномалий и соотношению легких и тяжелых элементов

(J_{La}/T_{La}). Проведено сравнение и нормализация концентраций микроэлементов во льдах с кларками элементов.



Рис. 2. Блок-схема программы анализа результатов исследований ионного и микроэлементного состава льдов, вод и отложений

Интерпретацию химического состава льдов осложняет отсутствие сведений о содержании микроэлементов во льду разного генезиса. Кроме того, необходимо учитывать возможное влияние на изменение химического состава микроорганизмов, находящихся в мерзлой толще.

Для апробации алгоритма обработки геохимических данных проведен анализ химического состава проб прибрежно-морского и озерного льда, поверхностных вод. Сезонные льды ключевых участков Ямала и Полярного Урала по количеству солей озерный и фирновый льды и поверхностные воды ультрапресные, прибрежно-морской лед – среднесоленый.

В прибрежно-морском льду соотношение ионов близкое к соотношению ионов в морской воде. В верхней части озерного льда установлено влияние морских аэрозолей в составе снега. Соотношения ионов в поверхностных водах обусловлено двумя источниками формирования – атмосферными осадками и обменными процессами с породами. Значения I/Cl и Br/Cl в озерном и прибрежно-морском льдах сопоставимы с соотношениями соответствующих кларковых значений, что подтверждает пригодность методики. Se_{an} аномалия в морском льду близка к 0, что характерно для морской воды; у озерного льда Se_{an} отрицательная (от 0,01 до 0,06). Так как озеро находится в непосредственной близости от побережья Карского моря, отрицательная Se_{an} связана с поступлением лантана со снегом, сорбиравшем морские аэрозоли. Eu_{an} в морском льду в среднем положительная (1,8) и варьирует от 0,4 до 3,0. В озерном льду Eu_{an} в среднем 0,95 что близко к значениям кларков речных вод, однако значение Eu_{an} варьирует от 0,65 до 1,39, что связано, с одной стороны, с поступлением морского аэрозоля и с другой – с перераспределением лантаноидов в процессе льдообразования из свободной воды. В фирновом льду низкая сумма ионов (1 мг/дм^3) и отсутствуют примеси морского аэрозоля. Состав микроэлементов в поверхностных водах и сезонных льдах позволяет отличать погребенные льды от других типов льда.

Глава 2. Геохимический состав полигонально-жилых льдов ключевых участков Карского региона

Раздел 2.1 посвящен геохимическому составу полигонально-жилых льдов (ПЖЛ) в прибрежной зоне арктической тундры с морским влиянием (о. Белый, о. Сибирякова, п. Диксон) (рис. 3). В ледяные жилы арктических островов ионы Cl^- и Na^+ поступали вместе с морскими аэрозолями в составе атмосферных осадков.

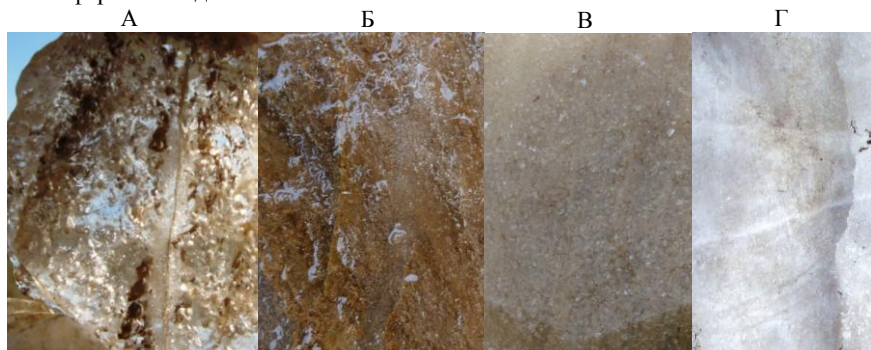


Рис. 3. Текстура ПЖЛ (фото Слагоды Е.А.): А – лед с минеральными и органическими примесями на о. Белый; Б – лед с минеральными и органическими примесями на о. Сибирякова; В – лед с минеральными примесями района, нижний ярус на склоне, п. Диксон; Г – лед с пузырьками, верхний ярус в низине, п. Диксон

В районе п. Диксон в ПЖЛ, изученных на склоне долины высотой 7 м над уровнем моря, преобладают ионы Ca^{+2} и HCO_3^- , источником которых были континентальные аэрозоли; в жилах, вскрытых в днище долины, преобладают ионы Cl^- и Na^+ , поступавшие с морскими водами при заливании низин. Лед жил арктических островов имеет отрицательную Se_{an} (0,60–0,74) и отрицательную Eu_{an} (0,86) аномалии, что подтверждает морское влияние на состав льда. Во льдах п. Диксон, залегающих в днище долины, Eu_{an} положительная (1,2), что связано с преобразованием состава воды при промерзании. Распределение отношений I/Cl и Br/Cl указывает на формирование ПЖЛ в прибрежно-морских условиях. В распределении микроэлементов в ПЖЛ прибрежной зоны арктической тундры выявлены тенденции к накоплению Cl , Mn , Br , Mo , I , лантаноидов и W .

Раздел 2.2 посвящен геохимическому составу ПЖЛ северной тундры (с. Гыда, м. Кареповский). Сингенетические ПЖЛ изучены на севере п-ва Гыдан на водораздельных поверхностях и в хасырее (осушенной озерной котловины) II-й озерно-аллювиальной террасы. В расчистках были вскрыты мёрзлые отложения, ледяные и ледогрунтовые жилы, линзовидные пластовые льды, трещинные льды и лед термоабразивной ниши.

Мёрзлые отложения хасырея и останцов II-й террасы приустьевого участка долины р. Гыда по составу водной вытяжки относятся к незасоленным континентальным образованиям. Отложения II-й террасы отнесены к аллювию

– осадкам прирусловых отмелей и пойм пресных текучих вод, сингенетически промерзавших с формированием ПЖЛ в сартанском периоде.

Текстурообразующие льды имеют континентальное засоление. Источником микроэлементов являются вмещающие суглинки и растительные остатки, распределения лантаноидов указывают на континентальное осадконакопление. По ионному составу текстурообразующие льды имеют сходство с современными осадками прирусловой отмели р. Гыда.

ПЖЛ, не имеющий минеральные включения, сформирован за счет атмосферных осадков с континентальными аэрозолями, а ледогрунтовые части – за счет надмерзлотных вод. Отрицательная Se_{an} (0,29) и положительная Eu_{an} (1,19) выявлена в ПЖЛ, залегающих в хасырее, и обусловлены биогенным преобразованием – влиянием органического вещества на состав жил (рис. 4).

В ПЖЛ в районе м. Кареповский выявлены высокие содержания P, Ti, V, Mn, Fe, Nb, Mo и лантаноидов, W и др. (рис. 5a). Жила залегает в отложениях, перекрытых антропогенными отложениями мощностью более 2 м – древесиной и корой, при разложении которой происходило формирование микроэлементного состава подземного льда.

Раздел 2.3 посвящен геохимическому составу ПЖЛ типичной тундры на п-ве Ямал. В районе м. Марре-Сале в составе льда жил по преобладанию ионов установлено поступление морских аэрозолей. Сумма лантаноидов (0,5–1,8 мкг/дм³) возрастает с возрастанием количества минеральных и органических включений.

В жилах, перекрытых торфом, отрицательная Se_{an} (0,43) обусловлена участием надмерзлотного стока и биогенного перераспределения лантаноидов. Положительная Eu_{an} связана с включением органического вещества и минеральных частиц в состав ПЖЛ. В составе микроэлементов выявлены тенденции к накоплению V, Nb и лантаноидов.

В районе оз. Сохонто ПЖЛ имеет повышенную минерализацию за счет надмерзлотных вод, выщелачивающих морские отложения. На перераспределение лантаноидов могут указывать: соотношение L_{La}/T_{La} (1,4–2,0), которое отличается от общего распределения (~1) во льдах ПЖЛ; отрицательная Se_{an} и положительная Eu_{an} аномалии.

В районе р. Юрибей в ультрапресных ПЖЛ установлена взаимосвязь суммы лантаноидов и количества минеральных частиц от 0,3 мкг/дм³ в «чистом» льду до 2,6 мкг/дм³ во льду с большим количеством минеральных частиц. Аномалии лантаноидов имеют небольшой диапазон вариаций Se_{an} (~1,0) и Eu_{an} (~1,1). Такой состав сформирован за счет атмосферных осадков и речных вод. В распределении микроэлементов выявлены тенденции к накоплению Sc, Mn, Fe, Co, Nb, Sn, лантаноидов.

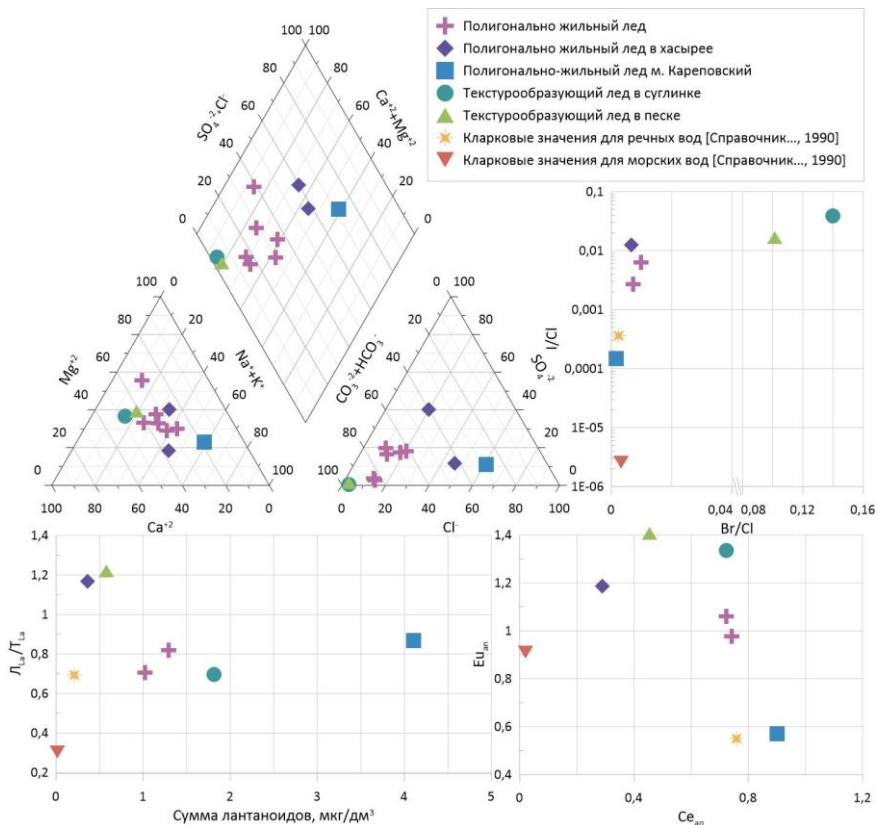


Рис. 4. Химический состав и аномалии лантаноидов в ПЖЛ северной тундры; L_{La}/T_{La} – соотношение легких и тяжелых лантаноидов; Eu_{an} – европиевая аномалия, Ce_{an} – цериевая аномалия

Раздел 2.4 посвящен криолитологическому строению и химическому составу подземных льдов южной тундры на севере Пур-Тазовского междуречья. Состав водорастворимых соединений торфа в верхней ($53,9 \text{ мг/дм}^3$) и нижней (239 мг/дм^3) части сильно отличается. Распределения лантаноидов в обоих слоях торфа схожи, что указывает на неизменность геохимической обстановки. В данном случае, отрицательная Ce_{an} связана с взаимодействием метилотрофных бактерий и лантаноидов.

Раздел 2.5 посвящен основным результатам исследований химического состава ПЖЛ. Химический состав ПЖЛ ультрапресный и пресный. Минерализация ПЖЛ, без участия минеральных включений, составляет $4\text{--}76 \text{ мг/дм}^3$. В ледогрунтовых частях ПЖЛ источниками повышенной минерализации ($68\text{--}141 \text{ мг/дм}^3$) служили грунты и органические остатки, затекавшие в трещину вместе с надмерзлотными водами.

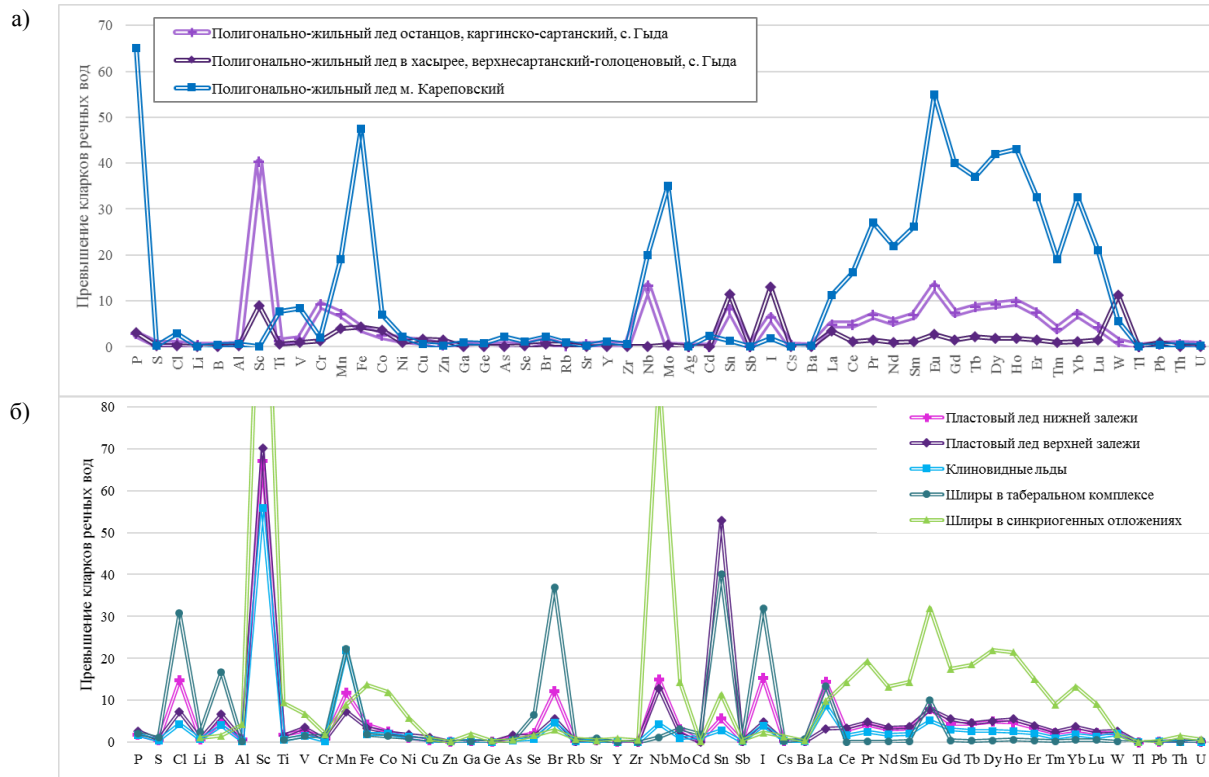


Рис. 5. Превышения содержаний микроэлементов над кларками речных вод: в ПЖЛ северной тундры (а); в пластовых и текстурообразующих льдах типичной тундры в районе м. Марре-Сале над кларками речных вод (б)

В результате анализа условий залегания льдов и результатов химического состава выделены основные маркеры источников поступления компонентов (рис. 6). Отрицательная Se_{an} является результатом: поступления морских аэрозолей в составе атмосферных осадков, участия надмерзлотных вод, выщелачивающих морские осадки; биогенного преобразования лантаноидов в торфе. Положительная Eu_{an} аномалия является показателем попадания частиц грунта в морозобойную трещину за счет участия надмерзлотных или поверхностных вод. Низкие значения I/Cl и $Bг/Cl$ являются показателем формирования химического состава льда за счет атмосферных аэрозолей, а высокие значения – показателем поступления органических веществ в состав жилы. Химический состав ПЖЛ отличается от текстуробразующих льдов в первую очередь более низкими концентрациями химических элементов. Накоплению микроэлементов способствуют: высокие фоновые концентрации элементов в атмосфере Арктической зоны Сибири за счет дальнего атмосферного переноса; попадание микроэлементов из отложений с надмерзлотными водами; попадание микроэлементов с поверхностными водами.

Основным источником химического состава ПЖЛ являются атмосферные зимние осадки с морскими или континентальными аэрозолями. Другим источником могут быть надмерзлотные воды сезонно-талого слоя. Их состав формируется в основном за счет отложений, дренируемых поверхностными и атмосферными водами. Третий источник – поверхностные воды, которые попадают в состав жил при подъеме уровня воды при морских нагонах или половодьях речных и озерных вод.

Глава 3. Химический состав пластовых льдов

Раздел 3.1 посвящен геохимическому составу линзовидного пластового льда на севере п-ва Гыдан. По соотношению основных ионов ультрапресный линзовидный пластовый лед очень близок с составом текстуробразующих льдов, однако минерализация и содержание микроэлементов в текстуробразующих льдах выше. Сумма лантаноидов в линзовидных пластовых льдах с органикой $0,6 \text{ мкг/дм}^3$, во льду с минеральными включениями $1,4 \text{ мкг/дм}^3$. Соотношение L_{La}/T_{La} ($0,73-0,76$) схоже с текстуробразующем льдом в суглинке, что также подтверждает обогащение водных растворов лантаноидами за счет глинистых отложений. Во льду с органикой Se_{an} ниже ($0,62$), чем по льду с минеральными включениями ($0,76$), за счет биогенного перераспределения лантаноидов.

В линзовидном пластовом льду с органикой Eu_{an} близка к единице ($0,95$); во льду с минеральными включениями Eu_{an} положительная ($1,07$), в текстуробразующих льдах Eu_{an} выше ($1,3-1,4$). Отношения I/Cl в линзовидных пластовых льдах схожи с текстуробразующими и находятся на диаграмме ближе к кларкам речных вод, чем к кларкам морских вод. Отношения $Bг/Cl$ во льду с органикой и в текстуробразующих льдах выше, чем во льду с минеральными частицами. Формирование линзовидных пластовых льдов происходило с вытеснением солей в поровый раствор вмещающих отложений – что соответствует сегрегационному механизму льдовыделения.

Маркеры источников ионов и микроэлементов в ПЖЛ

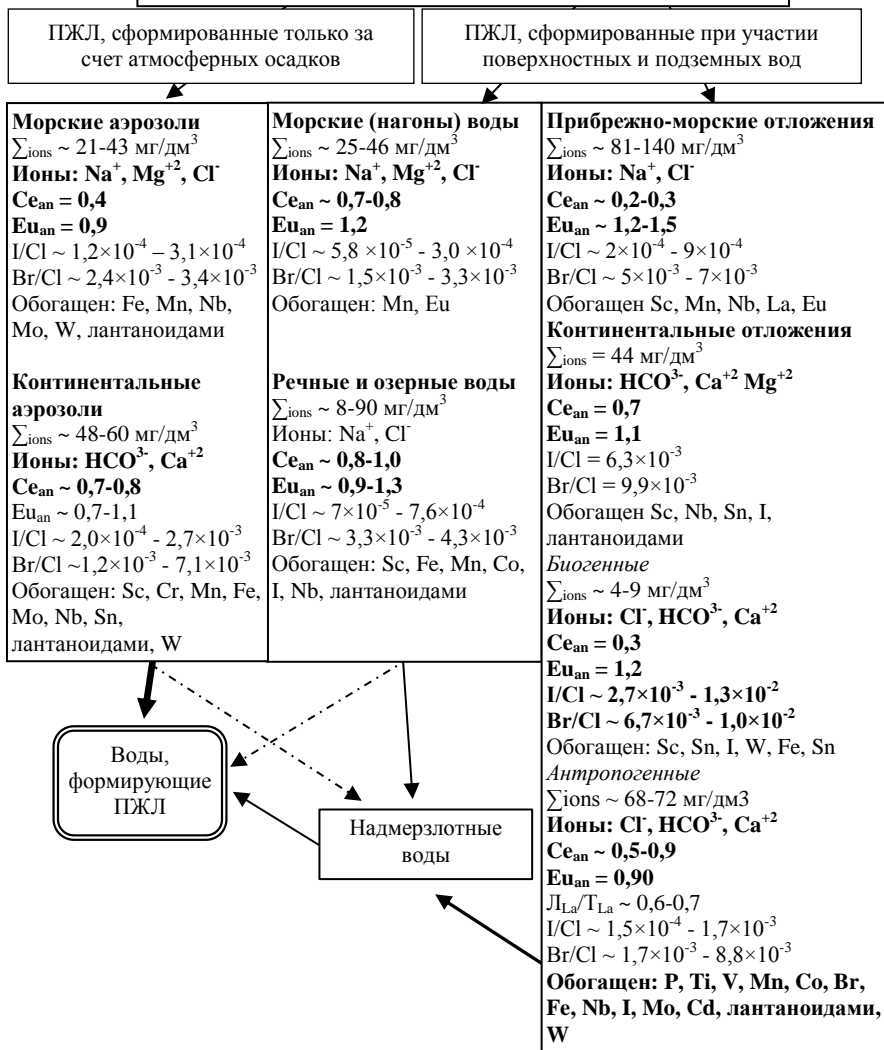


Рис. 6. Основные маркеры источников поступления ионов и микроэлементов в ПЖЛ и показатели химического состава льдов, сформированных преимущественно за счет одного источника поступления элементов: \sum_{ions} – сумма ионов, J_{La}/T_{La} – соотношение легких и тяжелых лантаноидов; $Eu_{ан}$ – европиевая аномалия, $Се_{ан}$ – цериевая аномалия; указаны микроэлементы, превышающие кларки речных вод более чем в 5 раз

Раздел 3.2 посвящен геохимическому составу пластовых льдов Западного Ямала. Геокриологический разрез в районе полярной станции Марре-Сале, расположенный в пределах III морской равнины Западного Ямала. Нижнюю часть разреза слагает марресальская свита с неровной кровлей, на глубине 0–20 м от поверхности вскрываются прибрежно-морские и дельтовые глинистые отложения, залегающие в виде складок с прослоями супесей и песков, редко с обломками коренных пород (рис. 7). В свите выделены породы с первичным эпикриогенным строением и протаявшие и вторично промерзшие отложения таберального комплекса. Верхнюю часть разреза слагают синкриогенные «байдарацкие» озерные, озерно-болотные, аллювиальные, эоловые пески, супеси, суглинки с возрастом автохтонных растительных остатков 23,8–5,2 тыс. л.н. и мощностью 2–15 м. Кровля этих отложений размыта, что маркируют линзы аллохтонных растительных остатков с возрастом 13,0–7,3 тыс. л.н. Покровный горизонт включает склоновые и эоловые пески, озерные супеси, автохтонный торф с возрастом 3,5–0,9 тыс. л. н.

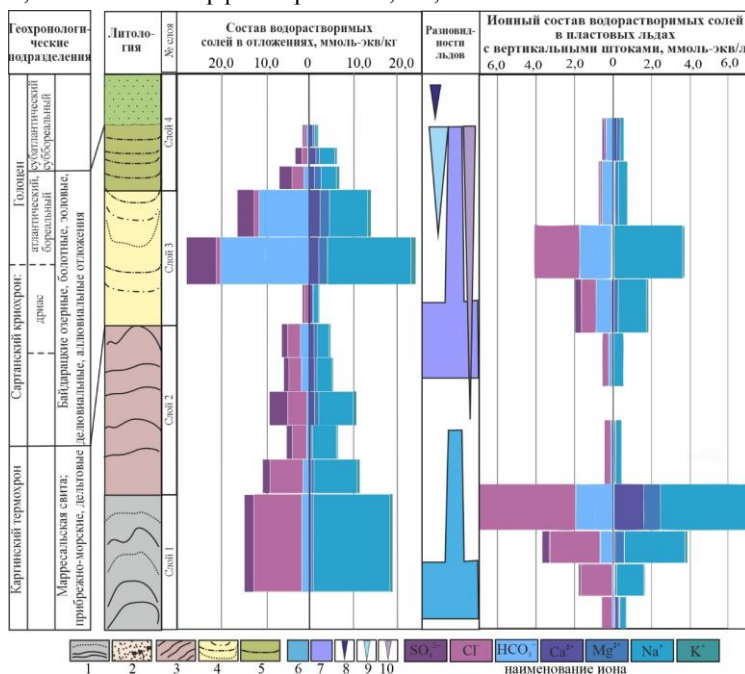


Рис. 7. Схематический разрез Марре-Сале, состав водорастворимых соединений отложений и пластовых льдов с вертикальными штоками. 1 – глины, суглинки с волнисто-складчатой слоистостью за счет прослоев светлых песков; 2 – пески тонкие пылеватые с прослойками «войлока» из мхов; 3 – таберальный комплекс: глины, суглинки, супеси; 4 – пески, супеси слоистые с прослоями и линзами корешков трав, мхов; 5 – супеси горизонтально-слоистые с атакситовой криотекстурой; 6 – пластовый лед нижней залежи; 7 – пластовый лед верхней

залежи; 8 – элементарные жилки; 9 – ПЖЛ; 10 – клиновидный лед (клиновидные тела с вертикально-волнистой слоистостью)

Многолетнемерзлые отложения разреза Марре-Сале отличаются по содержанию водорастворимых солей. Отложения марресальской свиты с первичным эпикриогенным строением по засоленности 0,1 % и содержанию 74 % хлоридов близки к водам неуплотненных донных прибрежно-морских осадков. При этом засоление происходило одновременно с осадконакоплением.

Отложения таберального комплекса марресальской свиты по засоленности 0,05 %, содержанию хлоридов – 55 % и сульфатов – 26 % накапливались в прибрежных условиях, были опреснены при протаивании и инфильтрации поверхностных вод в талики. На перераспределение элементов в талике могут указывать уменьшение доли Ni, Co, I вниз по разрезу, сохранении отрицательной Se_{an} , увеличение величины Eu_{an} . Колебания ионного состава и Fe/Ni, Fe/Co, La/Sm могут быть связаны с миграцией элементов из поверхностных вод и условиями промерзания в замкнутом талике.

В синкриогенных озерных и озерно-болотных отложениях по сравнению с подстилающими отложениями возрастает значение Se_{an} ; отмечено уменьшение Eu_{an} и La/Sm, что может быть связано с увеличением количества органических остатков в континентальных условиях осадконакопления. Текстурообразующий сегрегационный лед наследует состав микроэлементов и значения аномалий лантаноидов из вмещающих субаэральных и озерных отложений. Лед формировался за счёт пресной слабосвязанной внутригрунтовой влаги, обогащенной микроэлементами из отложений.

В пластовых льдах в районе м. Марре-Сале количество солей сильно варьирует от ультрапресных до слабосолёных (от 23 до 455 мг/дм³). Пластовые льды нижней залежи в среднем более минерализованы (155 мг/дм³), чем пластовые льды верхней залежи (94 мг/дм³).

Источником химических элементов в составе (рис. 5б) пластового льда нижней залежи, залегающего в морских отложениях, являются водорастворимые соединения прибрежно-морских отложений. Источником влаги для пластового льда, залегающего в синкриогенных отложениях, являются воды подозерных таликов. Ионный и микроэлементный состав пластового льда верхней залежи формировался за счет взаимодействия льдообразующей влаги с вмещающими отложениями: прибрежно-морскими и озерно-аллювиальными.

По содержанию и корреляциям ионов и аномалиям лантаноидов наблюдается сходство пластовых льдов и водорастворимых солей в отложениях, что подтверждает внутригрунтовой генезис. Внизу верхней залежи состав близок к поровым растворам морских отложений, а вверху – к составу вод талика. Верхние части штоков более пресные по составу ионов. В водоносном талике при промерзании происходила криогенная метаморфизация раствора – увеличивалась концентрация HCO_3^- , SO_4^{2-} и Ca^{+2} . Выявлено закономерное наследование пластовыми льдами Eu_{an} аномалии от вмещающих отложений.

Раздел 3.3 посвящен химическому составу шлиров льда в торфянике южной тундры. В пределах хасыреев на Севере Пур-Тазовского междуречья изучены шлиры в торфе. Лёд по количеству солей ($4,2 \text{ мг/дм}^3$) схож с минерализацией в ПЖЛ и в термокарстово-полостном льду, а по соотношению ионов – с гидрохимическим составом порового раствора в торфе. От термокарстово-полостного льда он отличается высоким содержанием сульфатов, поступающих в лёд из торфа при инфильтрации дождевой воды. Лёд имеет отрицательную Se_{an} (0,6), не связанную с морским влиянием, и положительную Eu_{an} (1,1) в результате сегрегационного льдообразования. Очень близкие значения аномалий выявлены в составе порового раствора в торфе (рис. 8).

Раздел 3.4 посвящен основным результатам анализа химического состава пластовых льдов, изученных в Карском регионе. Химический состав пластовых льдов имеет большой диапазон вариаций минерализации от 4 до 455 мг/дм^3 , содержаний ионов и микроэлементов (рис. 9). Сравнительный анализ условий залегания и состава выявил, что основными источниками химического состава пластовых льдов, изученных на ключевых участках Карского региона, являлись вмещающие отложения.

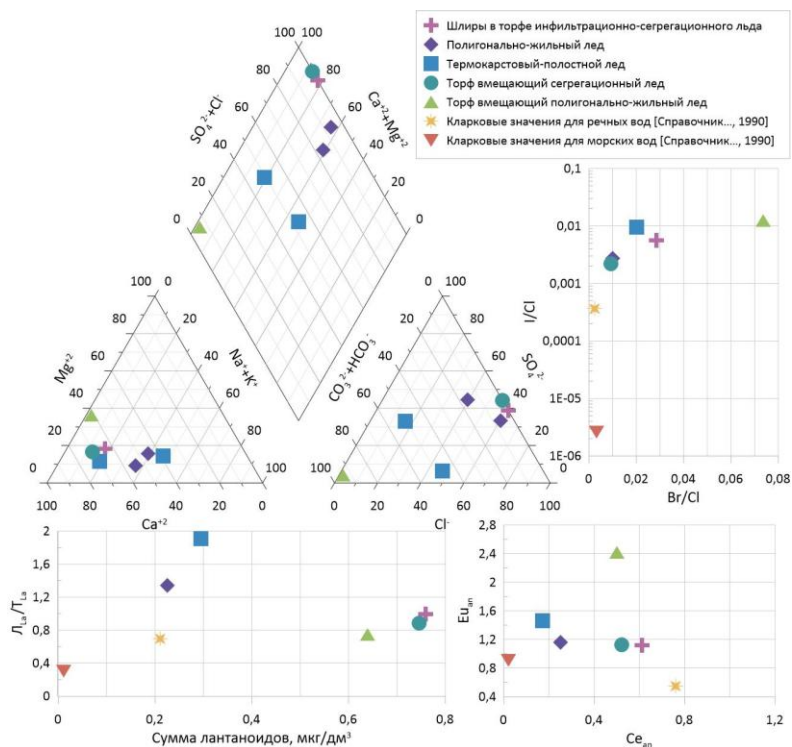


Рис. 8. Химический состав шлиров льда в торфе, ПЖЛ, термокарстово-полостного льда и порового раствора в торфянике южной тундры (с. Газ-Сале); L_{La}/T_{La} – отношение легких и тяжелых лантаноидов; Eu_{an} – европиевая аномалия, Ce_{an} – цериевая аномалия

В линзовидном пластовом льду на Севере Гыдана установлена повышенная концентрации ионов и микроэлементов на контакте лед – порода. Преобладающие ионы в линзовидном пластовом и текстурообразующих льдах совпадают. Следовательно, формирование линзовидного пластового льда сопровождалось миграцией вод к фронтам промерзания и концентрацией ионов в текстурообразующих льдах при эпигенетическом промерзании.

В пластовых льдах в районе м. Марре-Сале установлены большие вариациями концентраций ионов и микроэлементов по вертикали и латерали, выявлены отрицательная Ce_{an} , положительная Eu_{an} аномалии, что обусловлено условиями льдообразования. Формирование пластового льда большой мощности сопровождалось миграцией вод подоцерных таликов к фронту промерзания при эпигенетическом промерзании донных осадков.

В вертикальных штоках пластовых льдов в районе м. Марре-Сале выявлено перераспределение ионов и микроэлементов по вертикали и их связь с химическим составом вмещающих отложений. Формирование химического состава вертикальных штоков пластового льда происходило при промерзании таликов, смешанных инфильтрационных озерных вод и засоленных растворов из оттаявших прибрежно-морских отложений, о чем свидетельствуют перераспределение ионов и микроэлементов по вертикали, отрицательная Ce_{an} , положительная Eu_{an} .

В составе шлиров льда, залегающих в органическом горизонте, выявлено преобразование ионного и микроэлементного состава в результате взаимодействия с вмещающим торфом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геохимический состав подземных льдов необходим для определения их генезиса. Предложена методика интерпретации данных ионного и микроэлементного состава льда и воды; водорастворимых, подвижных, валовых форм элементов в породах. Программы обработки геохимических данных на основе статистических параметров и парного корреляционно-регрессивного анализа, выявил аномалии, распределение ионов, микроэлементов в льдах разного генезиса.

Прибрежно-морской и озерный льды наследуют соотношение ионов исходной воды. На химический состав фирнизированного снега, покрывающего озерный лед на Западном Ямале, влияли морские аэрозоли, обогащая состав ионами натрия и хлора, а также микроэлементами.

В голоценовых и неоплейстоценовых ПЖЛ севера Западной Сибири установлены различия в накоплении микроэлементов в зависимости от источников поступления компонентов. Химический состав ПЖЛ отличается от текстурообразующих льдов в первую очередь более низкими концентрациями химических элементов.

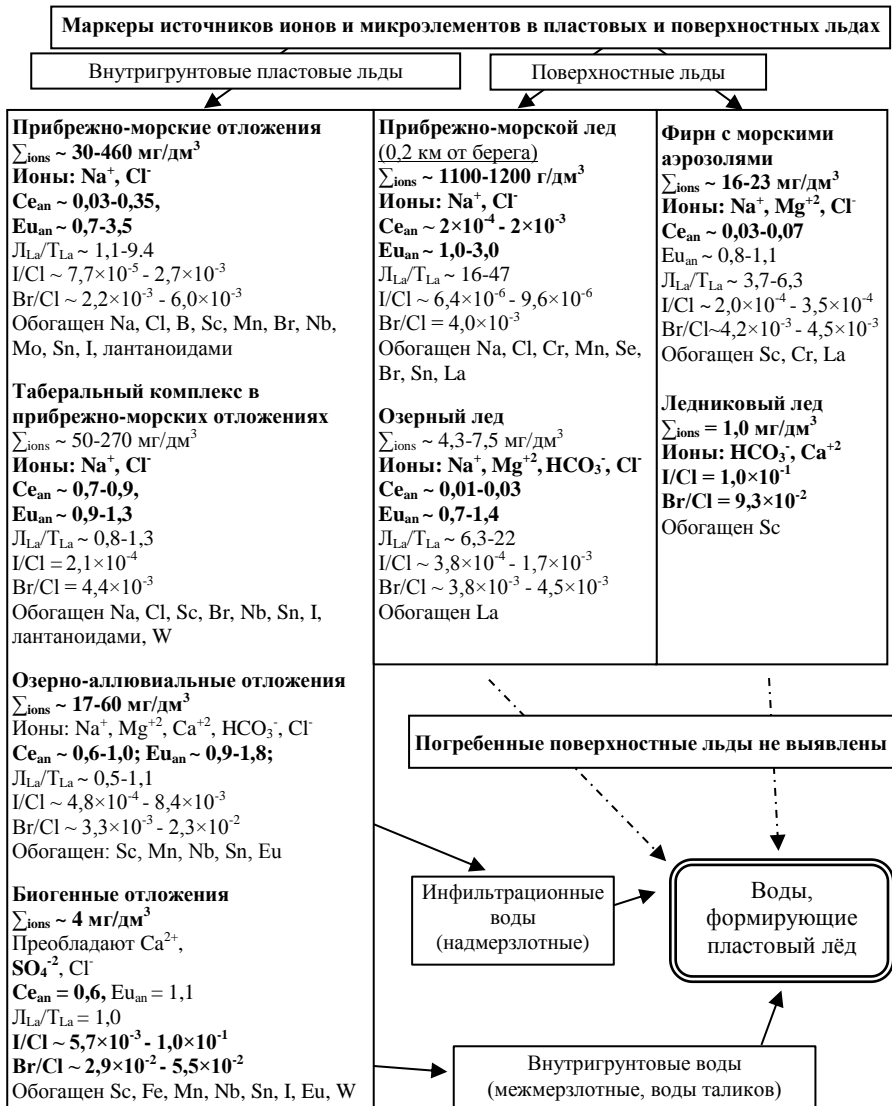


Рис. 9. Основные маркеры источников поступления ионов и микроэлементов в пластовых и поверхностных льдах и показатели химического состава льдов, сформированных преимущественно за счет одного источника поступления элементов: Σ_{ions} – сумма ионов, L_{La}/T_{La} – соотношение легких и тяжелых лантаноидов; Eu_{an} – европиевая аномалия, Ce_{an} – цериевая аномалия; указаны микроэлементы, превышающие кларки речных вод более чем в 5 раз

На микроэлементный состав льдов, в т.ч. лантаноидов влияет органическое вещество, сорбирующее многие микроэлементы. Незначительная глубина сезонного оттаивания мерзлых грунтов при образовании ПЖЛ препятствует разбавлению микроэлементов поверхностными водами на термодинамическом геохимическом барьере, что и создает условия для их концентрирования во льдах.

На химический состав ПЖЛ ключевых участков Карского региона, имели влияние морские или континентальные аэрозоли и надмерзлотные воды. Отрицательная цериевая аномалия является результатом: 1) участия морских аэрозолей в составе атмосферных осадков в районах, расположенных вблизи Карского моря; 2) участия надмерзлотных вод, выщелачивающих морские отложения; 3) биогенного перераспределения лантаноидов в торфе. В голоценовых ПЖЛ, формирующихся в полигональных торфяниках, по соотношениям I/Cl и Br/Cl, отрицательной цериевой аномалии выявлено биогенное концентрирование и перераспределение микроэлементов. Положительная европиевая аномалия в ПЖЛ является показателем попадания частиц грунта в морозобойную трещину с надмерзлотными или поверхностными водами.

Пластовые льды Западного Ямала и севера Гыдана от ультрапресного до слабосоленого состава обогащены относительно кларков речных вод микроэлементами в результате их перехода из вмещающих отложений при внутригрунтовом льдообразовании. Выявлена зависимость химического состава пластовых льдов и водорастворимых соединений в отложениях.

В линзовидном пластовом льду на Севере Гыдана установлена повышенная концентрации ионов и микроэлементов на контакте льда с вмещающими отложениями. При этом преобладающие ионы в линзовидном пластовом льду и текстурообразующих льдах совпадают. Формирование линзовидного пластового льда сопровождалось вытеснением солей в текстурообразующие льды во вмещающих отложениях, при этом преобладающие ионы не изменялись.

Пластовые льды Западного Ямала наследуют ионный и микроэлементный состав, а также отрицательная цериевая и положительная европиевая аномалии из вмещающих отложений. Пластовые льды отличаются большими вариациями концентраций ионов и микроэлементов по вертикали и латерали, что обусловлено условиями льдообразования. Вариациями концентраций ионов и микроэлементов обусловлены миграцией воды к фронту промерзания при эпигенетическом промерзании водонасыщенных отложений. В вертикальных штоках пластовых льдов Западного Ямала выявлено перераспределение ионов и микроэлементов по вертикали. Установлена связь химического состава вертикальных штоков пластового льда и вмещающих отложений. Пластовые льды отличаются в сто раз более высокими концентрации ионов и микроэлементов, чем ледниковый лед Полярного Урала, но имеют более низкие концентрации ионов натрия и хлора, чем прибрежно-морские льды, что указывает на внутригрунтовый генезис пластовых льдов.

Из анализа спектров распределений микроэлементов в изученных типах подземных льдов установлены маркеры источников поступления ионов и микроэлементов в полигонально-жильные, пластовые и поверхностные льды.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные публикации, входящие в список ВАК Минобрнауки России:

1. **Бутаков В.И.**, Слагода Е.А., Опокина О. Л., Томберг И.В., Жученко Н.А. Особенности формирования гидрохимического и микроэлементного состава разных типов подземных льдов мыса Марре-Сале // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 5, С. 29–44. doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-5(29-44).

2. **Бутаков В.И.**, Слагода Е.А., Тихонравова Я.В., Опокина О. Л., Томберг И.В., Жученко Н.А. Гидрохимический состав и редкоземельные элементы в полигонально-жильных льдах ключевых районов криолитозоны Карского региона // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2020, т. 331, № 2, С. 78-91. doi: 10.18799/24131830/2020/2/2483.

3. **Бутаков В.И.**, Тихонравова Я.В., Слагода Е.А. Закономерности формирования геохимического состава подземных льдов и отложений на севере полуострова Гыдан // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2018. т.131, № 5. С. 30-40.

4. Тихонравова Я.В., Лупачёв А.В., Слагода Е.А., Рогов В.В., Кузнецова А.О., **Бутаков В.И.**, Симонова Г.В., Таратунина Н.А., Муллануров Д.Р. Строение и формирование ледогрунтовых жил второй озёрно-аллювиальной террасы на севере Гыдана в позднем неоплейстоцене–голоцене // Лёд и Снег, 2019, т. 59, № 4. С. 557–570.

5. Тихонравова Я.В., Слагода Е.А., Рогов В.В., **Бутаков В.И.**, Лупачёв А.В., Кузнецова А.О., Симонова Г.В. Гетерогенное строение полигонально-жильных льдов в торфяниках Пур-Тазовского междуречья // Лёд и Снег, 2020, т. 60, № 2. С. 225-238.

Другие научные публикации

6. **Бутаков В.И.**, Слагода Е.А. Связь химического состава с условиями формирования линзовидного пластового льда в аллювиальных отложениях на севере п-ва Гыдан // Материалы всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика». Иркутск: ИЗК СО РАН. 2021. С. 55–57.

7. **Бутаков В.И.**, Слагода Е.А., Тихонравова Я.В. Микроэлементный состав и кристаллическая структура сезонных льдов в районе м. Марре-Сале // Материалы всероссийской конференции с международным участием «Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне». Якутск: ИМЗ СО РАН. 2020. С. 69–72.

8. **Бутаков В.И.** Техногенное загрязнение полигонально-жильных и сезонных льдов севера Западной Сибири // Материалы Национальной научно-практической конференции «Нефть и газ: технологии и инновации». Тюмень: ТИУ. 2019. т. 2. С. 12–14.

9. **Бутаков В.И.**, Слагода Е.А. Криогенное концентрирование и миграционная способность элементов при формировании подземных льдов // Материалы международной научно-практической конференции.

«Арктика: современные подходы к производственной и экологической безопасности в нефтегазовом секторе». Тюмень: ТИУ. 2020. 2 т. С. 47–50.

10. Слагода Е.А., Тихонравова Я.В., **Бутак** В.И., Опокина О.Л. Проблемы полевых исследований пластовых льдов в разрезах многолетнемерзлой толщи м. Марре-Сале Западного Ямала (итоги 2008-2019 гг.) // Тезисы докладов всероссийской научной конференции «Взаимодействие элементов природной среды в высокоширотных условиях». Сочи. 2019. С. 61–62.

11. **Бутак** В.И., Тихонравова Я.В. Гидрохимия поверхностных вод и подземных льдов полуострова Гыдан // Сборник тезисов докладов XX науч.-практич. конф. молодых ученых и специалистов «Проблемы развития газовой промышленности». Тюмень. 2018. С. 17–18.

12. Тихонравова Я.В., Слагода Е.А., **Бутак** В.И., Курчатov В.В. Формирование льда-полосатика // Материалы XI Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоуедения. Магадан. 2017. С. 332.

13. Tikhonravova Y.V., Slagoda E.A., **Butakov V.I.** Heterogeneous formation of Holocene ice wedge within peatland on Gydan Peninsula // The 2nd Asian Conference on Permafrost. Sapporo, Japan, 2017.

14. Tikhonravova Ya.V., Galeeva E.I., Kurchatov V.V., **Butakov V.I.**, Slagoda E.A. Structure and texture of ice wedge complex under the drained lakes (Gydan Peninsula, Russia) // Book of Abstracts «Pushchino Permafrost Conference «Earth's Cryosphere: Past, Present and Future». 2017. P. 38-40.

15. **Butakov V.I.**, Tikhonravova Ya.V., Slagoda E.A. Geochemistry of deposits and ice wedge of khasyrey on the north Gydan Peninsula / Book of Abstracts «Pushchino Permafrost Conference «Earth's Cryosphere: Past, Present and Future». 2017. P. 90-91.

16. Тихонравова Я.В. **Бутак** В.И., Слагода Е.А. Кристаллическая структура льда термоабразионной ниши // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Научная и производственная деятельность – средство формирования среды обитания человечества». Тюмень: ТИУ. 2017. С. 278-285.