

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Васильчук Ю.К. Концентрация основных растворимых ионов в ледяных жилах ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7 Батагайской едомы // Арктика и Антарктика. 2024. № 4. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.4.72210 EDN: LBJOHS URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=72210

Концентрация основных растворимых ионов в ледяных жилах ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7 Батагайской едомы

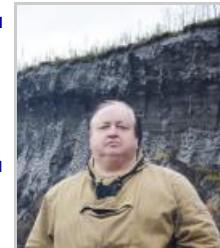
Васильчук Юрий Кириллович

ORCID: 0000-0001-5847-5568

доктор геолого-минералогических наук

профессор; кафедра геохимии ландшафтов и географии почв; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 2009



✉ vasilch_geo@mail.ru

[Статья из рубрики "Многолетнемерзлые породы и подземные льды Арктики, Антарктики и горных регионов"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2024.4.72210

EDN:

LBJOHS

Дата направления статьи в редакцию:

04-11-2024

Дата публикации:

23-11-2024

Аннотация: Предметом исследования является ионный состав позднеплейстоценовых сингенетических повторно-жильных льдах (ПЖЛ) нижней части едомного комплекса: ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7 Батагайской едомы. Образцы льда отбирались из ледяных жил по вертикали через каждые 10 см с помощью дрелей Makita и Bosch GSR со стальными коронками для льда диаметром 51 мм. Измерения макрокомпонентного состава льда проводились с помощью ионного хроматографа «Стайер». Для ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7 были определены концентрации калия, натрия, кальция, магния, хлора, нитратов, сульфатов. Минерализация позднеплейстоценового жильного льда варьирует от 67 до 425 мг/л. В изученных ледяных жилах среди катионов доминирует кальций (ПЖЛ-5 от 17,8 до 82,5 мг/л, ПЖЛ-7 от 12,0 до 52,1 мг/л). На втором месте магний (ПЖЛ-5 от 3,1 до 13,6 мг/л,

ПЖЛ-7 от 2,6 до 8,3 мг/л). Катионы натрия и калия содержатся в небольших количествах. Na в ПЖЛ-5 от 0,8 до 6,8 мг/л, ПЖЛ-7 от 0,45 до 4,0 мг/л, а K в ПЖЛ-5 от 17,8 до 82,5 мг/л, ПЖЛ-7 от 1,1 до 5,6 мг/л. Среди анионов превалируют нитраты: ПЖЛ-5 от 6,9 до 27,9 мг/л, ПЖЛ-7 от 5,0 до 54,8 мг/л, среднее содержание нитратов: ПЖЛ-5 – 14,5 мг/л, ПЖЛ-7 – 12,2 мг/л. В ПЖЛ-5 анионов сульфатов содержится от 2 до 17 мг/л, в среднем – 6,4 мг/л, хлоридов содержится от 1 до 7 мг/л, в среднем 2,6 мг/л. В ПЖЛ-7 сульфатов содержится от 1,4 до 40,5 мг/л- в среднем 5,79 мг/л, хлоридов содержится от 1,13 до 4,5 мг/л, в среднем 2 мг/л. По ионному составу лёд ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7 соответствуют снегу, сформированному под воздействием континентальных воздушных масс.

Ключевые слова:

многолетнемерзлые породы, едома, повторно-жильные льды, радиоуглеродный возраст, крио geoхимия, ионный состав, макроэлементный состав, Батагай, Сибирь, Якутия

Исследования выполнены в рамках НИР: Антропогенная геохимическая трансформация компонентов ландшафтов (ГЗ) (номер ЦИТИС: 121051400083-1), при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №23-17-00082: "Палеоцикли углерода-азота в экосистемах бугристых и полигональных торфяников, едомы и в пластовых льдах на севере России").

Введение

Макроэлементный состав подземных льдов формируется при совокупном влиянии ионного состава вод, сформировавших эти льды, и макрокомпонентного состава вмещающих льды отложений. Например, подземные льды в кимберлитовых трубках западной Якутии имеют разный ионный состав благодаря тому, что вмещающие их породы содержат существенно различающееся количество анионов и катионов.^[1,2] Химический состав пластовых льдов Новосибирских островов в целом отражает макроэлементный состав вмещающих их отложений.^[3] Морские аэрозоли влияют на засоление повторно-жильных льдов о. Сибириякова.^[4] Уменьшение NaCl засоления ПЖЛ о. Сибириякова отражает почти полную потерю влияния моря на состав льдов в голоцене.^[5]

Макроэлементный состав может быть использован в качестве индикатора смены геохимических условий миграции и аккумуляции химических элементов, происходящей в результате смены ландшафтных условий льдообразования. Общая минерализация северо-якутских льдов относительно низкая (до 90 мг/л), однако встречаются аномалии солёности (от менее чем 30 мг/л до 400-430 мг/л).^[6,7]

Ранее при участии автора проанализирован ионный состав других жил Батагайской едомы и приведены некоторые обобщенные сведения о солености повторно-жильных льдов №17 и №20.^[8-10]

Геохимический состав позднеплейстоценовых повторно-жильных льдов в едомных толщах Станчиковского Яра и у пос. Черский на севере Якутия также исследован на том же приборе Стайер, что и жилы Батагайского разреза.^[11]

Iizuka et al.^[12] провели исследование жильных льдов, вскрытых обнажением мыса

Барроу (Северная Аляска). Ca^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- и другие ионы, входящие в состав льдов, имели морское и континентальное происхождение. Соотношение концентраций одинаковых ионов морского и континентального происхождения свидетельствует о разной роли морской воды в формировании макроэлементного состава льдов. Исследователями было установлено, что весь объём Na^+ имеет морское происхождение. Континентальное происхождение имели ионы Ca^{2+} и SO_4^{2-} , содержащиеся в количестве 0,022 ммоль/л и 0,06 ммоль/л, соответственно. Таким образом, было установлено, что макрокомпонентный состав жильных льдов сформировался под совокупным воздействием вмещающих льды грунтов (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) и вод моря Бофорта (Na^+ , Cl^- , Br^-).

К. Кэмпбел-Хитон [13] в повторно-жильных льдах на территории Юрика-Саунд и фьорда Мокка и в Нунауте исследован изотопный и ионный состав голоценовых и позднеплейстоценовых ледяных жил. Ею установлено, что для палеореконструкций лучше подходят ледяные жилы средней ширины (1-2 м), поскольку эти клинья сохраняют более высокое временное разрешение из-за высокой вероятности растрескивания. При горизонтальном отборе по четырем ледяным жилам установлено, что морозобойные трещины далеко не всегда образуются по центру жил, новый лед формируется достаточно случайно по обе стороны от центра. Это подтвердили радиоуглеродные определения по льду жил, показывающие произвольную смену возраста от центра к краю. Поэтому, чтобы установить правильную хронологию образцов необходимо опираться на прямые AMS датировки ледяных жил. [13]

Цель данной работы изучить состав ионов во льду повторно-жильных льдов №5 и №7 Батагайской едомы, чтобы определить главный источник образования льда.

Объекты и методы

Батагайский овраг

Авторами изучены сингенетические повторно-жильные льды, вскрывающиеся в Батагайском овраге ($67^{\circ}34'49''$ с.ш., $134^{\circ}46'19''$ в.д.), расположенном в 10 км юго-восточнее пос. Батагай, в Верхоянском улусе, Республики Якутия (Саха) (рис. 1).

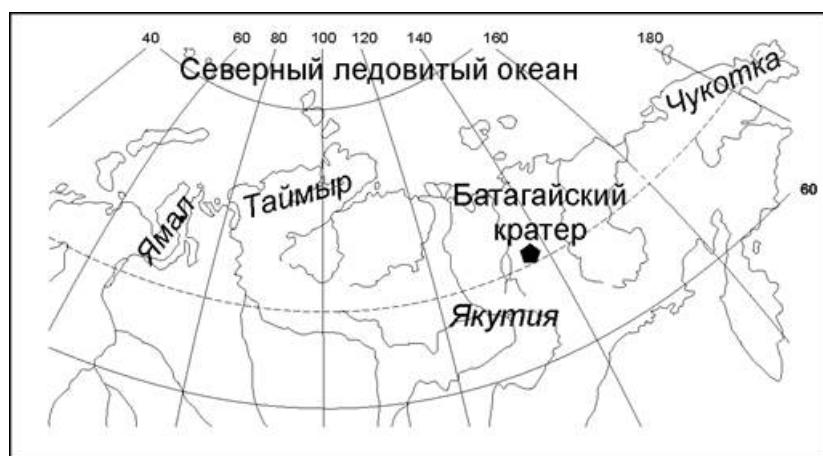


Рис. 1. Местоположение Батагайского кратера (мегаоврага)



Рис. 2. Едома в восточной части обнажения Батагайского кратера

Батагайский овраг (также называемый Батагайкой из-за близости к р. Батагайке) находится в пределах Яно-Адычского плоскогорья в бассейне р. Яна, он окружен хребтом Черского на востоке, Верхоянским хребтом на западе и Эльгинским плоскогорьем на юге. Яно-Адычское плоскогорье сложено алевролитами, песчаниками, глинистыми сланцами триаса и юры, прорванными гранитными интрузиями.

Батагайский овраг расположен на склоне, обращенном на юго-восток 1,5 км вниз по склону у подножья горы Киргилях, чья абсолютная высота составляет 612 м. Протяженность оврага на 2019 год составляет 2,29 км, ширина – 1 км, глубина в среднем около 80 м. Западный борт оврага, находящийся выше по склону, чем восточный, имеет абсолютную высоту 325 м, а восточный – на 38 м ниже, его абсолютная высота 287 м, средний уклон между западным и восточным бортом 4,7%. Обзор серии мультисенсорных спутниковых изображений Батагайского оврага с 1991 по 2018 показал, что площадь оврага увеличилась по меньшей мере в 3 раза – от 0,19 до 0,78 км², наиболее значительный рост пришёлся на период между 2010 и 2014, а затем замедлился.[\[14\]](#)

Абсолютные высоты опробованных ледяных жил (ПЖЛ или IW) и текстурного льда (ТЛ): ПЖЛ-5 – 273-266 м; ПЖЛ-7 – 239-226 м. Точки ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7 относятся к восточному борту оврага (рис. 3).



Рис. 3. Расположение опробованных обнажений повторно-жильных льдов ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7. Были также опробованы р. Яна и Батагайка для сравнения их химического состава с химическим составом жил: 1 – точки отбора проб; 2 – ионный состав льда; 3 –

содержание основных элементов во льду и почвенных включениях во льду; 4 – содержание микроэлементов во льду и почвенных включениях



Рис. 4. Разрез опробованного обнажения повторно-жильных льдов ПЖЛ-5



Рис. 5. Разрез опробованного обнажения повторно-жильных льдов ПЖЛ-7

Опираясь на более ранние исследования [15], включая наши собственные данные [16-18] мы рассматриваем IW-5 и IW-7 как повторно-жильные льды позднеплейстоценового едомного комплекса.

Климат, по данным метеостанции Батагай близок к умеренно-холодному. [19] Среднегодовая температура воздуха – $-14,8^{\circ}\text{C}$. Наиболее холодный месяц – январь с температурами от -43 до -51°C . [20] Выпадает около 194 мм осадков в год. Самые сухие месяцы: март, январь и февраль – обычно не более 5 мм осадков. Большая часть осадков здесь выпадает в июле до 43 мм, в среднем 37 мм. Преобладающий ветер зимой (январь) – юго-западный, летом (июль) – северный или северо-восточный.

Многолетнемерзлые породы в бассейне р. Яны имеют сплошное распространение. Активный слой достигает мощности лишь 0,2-0,4 м под лесом и мхом, и 0,4-1,2 м на открытых площадках. Многолетнемёрзлые породы высокольдистые, широко распространены криогенные процессы: термокарст, термоэррозия, солифлюкция, выветривание, морозобойное растрескивание и т. д.

Растительность северо-таежного и лесотундрового типа. Доминируют лиственничные

редколесья. Видовой состав представлен лиственницей Каяндеры, берёзой, береской карликовой, ольхой, кедровым стланником, багульником, лапчаткой Толля, осокой рыхлой, шикшей сибирской, брусликой, голубикой, мохово-лишайниковыми комплексами.[\[21\]](#)

По сравнению с почвенным покровом западной части Якутии, где, несмотря на схожие суровые климатические условия, встречаются в основном мерзлотные аналоги суб boreальных почв (серые лесные мерзлотные – под мелколиственной растительностью на водоразделах, буровёмы мерзлотные – под хвойными лесами, буровёмы мерзлотные – на склоновых поверхностях), в восточной части Якутии структура почвенного покрова представлена типичными почвами бореальной и лесотундровой зон.[\[22\]](#)

На горных плакорах и их склонах, на каменистых или щебнистых отложениях под кедрово-стланниковой и редкостойно-таежной растительностью обычно формируются мерзлотные слаборазвитые (примитивные) каменистые почвы (регосоли).[\[23\]](#) Эти почвы представляют собой лишь один маломощный горизонт с невысоким содержанием гумуса, под которым залегает почвообразующая порода.[\[24\]](#)

На склонах, на горно-склоновом типе местности вышеуказанные типы почв постепенно сменяются на мерзлотные подбуры, которые сформированы на элювиальных и элювительно-элювиальных отложениях под лиственничниками. Эти почвы в районе исследования широко распространены и занимают значительную часть данной территории.

На ложбинах стока, днищах долин малых рек (мелкодолинные типы местности) сформированы мерзлотные торфяно- и перегнойно-глеевые почвы. Они обычно распространены локальными участками и занимают незначительные площади. Пойменные ландшафты рек Яна и Батагайка представлены мерзлотными аллювиальными слоистыми слаборазвитыми (примитивными) песчаными почвами и разновидностью мерзлотных аллювиальных почв.[\[24\]](#)

В объяснительной записке к государственной геологической карте[\[25\]](#) район пос. Батагай обозначен как редкометалльно-вольфрамово-оловорудный район с запасами таких металлов как: Cu, Zn, W, Pb, Sn, Zn, Li, Bi, Cd, Ga, Ti, Rb, Cs. Ранее активно разрабатывались месторождения олова близ посёлков Батагай и Эсэ-Хайя . В 1990-е годы добыча прекратилась. Формирование оврага связывают с вырубкой леса на склоне Киргиляха, а также освоением залежей олова в 1940-60 гг. и дальнейшей термокарстовой эрозией.[\[24\]](#)

Отбор образцов и пробоподготовка

Отбор образцов льда из повторно-жильных льдов, вскрываемых обнажением Батагайского оврага, производился в августе 2018 гг.

Образцы льда отбирались из ледяных жил по вертикали через каждые 10 см с помощью дрелей Makita DDF481rte 18V и Bosch GSR 36 VE-2-LIc стальными коронками для льда диаметром 51 мм.



Рис. 6. Трасса отбора образцов с помощью электродрели (круглые лунки) из обнажения повторно-жильных льдов ПЖЛ-7

Для зачистки места отбора приповерхностный слой мощностью 2-3 см льда снимался с помощью бура и далее отбирались более глубинные образцы из той же лунки. Образец льда диаметром 5 см. высверливался из жил, при этом масса каждого образца составляла около 150 г и упаковывался в полиэтиленовые пакеты. Отбор льда сопровождался подробным описанием цвета, прозрачности, структуры, толщины ледяных и грунтовых прожилок, включений, формы и размера ксенолитов, пузырьков воздуха. Координаты разрезов регистрировались с помощью GPS.

Образцы для ^{14}C датирования вырубались из ледяных жил при помощи топора таким образом, что масса каждого образца составляла не менее 0,5-1 кг. Вырубленный лёд упаковывался в пластиковые пакеты (рис. 7).



Рис. 7. Образцы для ^{14}C датирования вырубленные из ледяной жилы ПЖ Л-7 при помощи топора

Лёд растапливался в пакетах при температуре +20°C. Каждый образец талой ледяной воды делился на 2 равные части – фильтрованную и нефильтрованную. «Нефильтрованная вода» означает, что образец этой воды был перелит во флакон непосредственно после оттаивания льда без каких-либо дополнительных манипуляций. С помощью pH- и EC-метров измерялись кислотность и электропроводность талой воды. Технические характеристики pH-метра HANNA pHep 4 HI98127 следующие: диапазон pH – от 0,0-14,0; точность измерения – до 0,1 единицы pH; погрешность измерения – 0,1 единица pH. Технические характеристики EC-метра HANNA HI 98311 следующие: диапазон электропроводности – от 0,0 до 3999,0 $\mu\text{S}/\text{см}$; точность измерения – до 0,1 $\mu\text{S}/\text{см}$, конверсионный коэффициент EC-TDS равен 0,45. Затем талая вода переливалась в пластиковые флаконы ёмкостью 10 мл с плотно закрывающейся крышкой.

Лабораторный анализ

Измерения макрокомпонентного состава льда проводились с помощью ионного хроматографа «Стайер» (Россия), предел детектирования по хлорид-иону 0,02 мг/л. Ионный хроматограф «Стайер» предназначен для качественных и количественных определений неорганических соединений F^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} и Ca^{2+} в водных растворах различного происхождения (природных, технических, питьевых).

Его устройство включает изократический насос, кондуктометрический детектор, разделительную колонку, систему подавления фоновой проводимости и компьютерный комплект для сбора, обработки и хранения хроматографических данных.

Для проб из повторно-жильных льдов использована методика выполнения измерений массовой концентрации катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ в пробах питьевой, минеральной, природной и сточной воды методом ионной хроматографии ФР.1.31.2005.01738. Диапазон определяемых концентраций 0,10-20,00 мг/дм³, а для определения анионов - использована методика выполнения измерений массовой концентрации Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- в пробах питьевой, минеральной, природной и сточной воды методом ионной хроматографии ФР.1.31.2005.01724. Диапазон определяемых концентраций 0,10-20,00 мг/дм³ и методика выполнения измерений массовой концентрации ионов в пробах природной, питьевой и сточной воды методом ионной хроматографии ПНД Ф 14.1:2:4. 132-98. Диапазон определяемых концентраций по катионам 0,10-150,00 мг/дм³.

Данным методом измерялся состав талой воды ПЖЛ 5 и 7.

Результаты

Ионный состав льда и содержание макроэлементов

Изучен ионный состав льда жильного льда, вскрытого в Батагайском овраге в 35 образцах из ПЖЛ 5 и 36 образцах из ПЖЛ 7.

Для ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7 были определены концентрации макроэлементов: K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} . В основном исследуемый лёд слабощелочной. Минимальные значения ЕС позднеплейстоценового повторно-жильного льда ПЖЛ-5 в Батагайской едоме составляют 72 $\mu S/cm$, максимальные 286 и средние 133 $\mu S/cm$, а ПЖЛ-7, 71, 296 и 121 мсм, соответственно, соответственно, т.е. общая минерализация ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7 очень близка. Все льды относятся к кислородным по показателю окислительно-восстановительного потенциала (Eh), то есть, условия миграции элементов окислительные слабощелочные. Лёд ПЖЛ в основном пресный (средняя сумма ионов ПЖЛ-5 200 мг/л, (средняя сумма ионов ПЖЛ-7 164 мг/л) по классификации ПЖЛ.^[7] В ПЖЛ-5 максимальные значения минерализации достигают 424 мг/л, что позволяет отнести этот образец льда к слабосолёным.

В растворенной форме в изученных ПЖЛ среди катионов доминирует Ca^{2+} (ПЖЛ-5 от 17,8 до 82,5 мг/л, ПЖЛ-7 от 12,0 до 52,1 мг/л), на втором месте Mg^{2+} (ПЖЛ-5 от 3,1 до 13,6 мг/л, ПЖЛ-7 от 2,6 до 8,3 мг/л).

Na^+ и K^+ содержатся в растворенной форме в меньших количествах: Na^+ – ПЖЛ-5 от 0,8 до 6,8 мг/л, ПЖЛ-7 от 0,45 до 4,0 мг/л, а K^+ – ПЖЛ-5 от 17,8 до 82,5 мг/л, ПЖЛ-7 от 1,1 до 5,6 мг/л.

Среди анионов превалируют нитраты (NO_3^-): ПЖЛ-5 от 6,9 до 27,9 мг/л, ПЖЛ-7 от 5,0 до 54,8 мг/л, среднее содержание NO_3^- : ПЖЛ-5 14,5 мг/л, ПЖЛ-7 12,2 мг/л (см. табл. 1, 2).

Таблица 1. Ионный состав позднеплейстоценового повторно-жильного льда, ПЖЛ-5, Батагайская едома

67°34'56'' с.ш., 134°46'53'' в.д. (№ 5-52) отбор льда с гл. 9,25-16,35 м (273,75 - 266,65 м абс. выс.)

номер образца	Глуб., м (абс. выс., м)	EC, мСМ	Na ⁺ , мг/л	K ⁺ , мг/л	Mg ²⁺ , мг/л	Ca ²⁺ , мг/л	Cl ⁻ , мг/л	NO ₃ ⁻ , мг/л	SO ₄ ²⁻ , мг/л	“ моль/моль SO ₄ ²⁻ / Cl ⁻
18-B-VV/52	9,25 (273,75)	183	2,12	1,07	7,01	42,31	7,14	6,59	11,1	1,75 1,55
18-B-VV/51	9,4 (273,6)	157	3,29	1,34	7,49	38,02	2,68	13,21	6,58	1,10 2,46
18-B-VV/49	9,7 (273,3)	97	2,01	1,98	4,35	34,96	1,23	9,46	5,47	0,61 4,45
18-B-VV/47	10 (273)	133	2,46	1,90	7,12	41,08	1,34	12,90	6,08	0,60 4,54
18-B-VV/46	10,15 (272,85)	114	1,50	1,53	5,11	34,85	1,95	14,12	4,70	1,12 2,41
18-B-VV/44	10,45 (272,55)		3,03	2,82	6,58	45,52	3,45	37,87	4,70	1,99 1,36
18-B-VV/43	10,6 (272,4)	204	2,60	1,90	9,60	48,20	2,68	14,54	16,5	0,44 6,16
18-B-VV/42	10,75 (272,25)	128	3,77	1,55	7,17	42,06	1,68	14,42	7,23	0,63 4,30
18-B-VV/40	11,05 (271,95)	148	3,13	1,31	7,80	39,80	1,08	11,71	6,62	0,44 6,13
18-B-VV/38	11,35 (271,65)		3,64	1,42	5,82	32,74	2,60	7,70	5,48	1,29 2,11
18-B-VV/37	11,5 (271,5)	99	2,53	1,45	4,01	19,15	1,76	7,30	7,03	0,68 3,99
18-B-VV/36	11,65 (271,35)	128	3,34	1,90	5,60	24,08	1,56	11,74	6,56	0,64 4,21
18-B-VV/34	11,95 (271,05)	72	0,95	0,78	3,05	17,82	1,09	7,61	2,92	1,01 2,68
18-B-VV/33	12,1 (270,9)	146	2,56	1,38	7,03	45,47	1,50	10,61	6,13	0,66 4,09
18-B-VV/31	12,4 (270,6)	141	3,80	1,08	6,33	37,60	1,90	9,75	6,11	0,84 3,22
18-B-VV/29	12,7 (270,3)	156	4,85	1,16	7,43	43,74	2,26	13,24	7,32	0,84 3,24
18-B-VV/28	12,85 (270,15)		4,35	1,61	6,07	34,72	2,49	13,83	6,96	0,97 2,80
18-B-VV/27	13 (270)	104	1,23	1,65	4,32	24,70	1,17	8,36	2,57	1,23 2,20
18-B-VV/25	13,3 (269,7)	128	2,68	1,51	6,57	38,06	1,11	11,06	3,79	0,79 3,41
18-B-VV/24	13,45 (269,55)	110	2,34	1,70	4,64	31,64	1,61	9,70	5,01	0,87 3,11
18-B-VV/23	13,6 (269,4)		1,60	1,44	3,30	24,30	1,18	7,81	2,80	1,14 2,37
18-B-VV/21	13,9 (269,1)	85	1,19	1,17	3,09	19,07	1,63	6,94	2,49	1,77 1,53
18-B-	14,2									1,10 2,47

VV/19	(268,8)	131	2,12	1,37	5,95	39,12	2,27	11,57	5,60	-,-	-,-
18-B- VV/17	14,5 (268,5)	86	1,67	1,26	4,30	28,49	1,84	9,24	2,57	1,94	1,40
18-B- VV/16	14,65 (268,35)		2,11	1,90	4,43	24,80	2,18	10,70	3,40	1,74	1,56
18-B- VV/15	14,8 (268,2)	101	1,96	1,60	4,16	28,31	2,37	11,37	3,53	1,82	1,49
18-B- VV/14	14,95 (268,05)	151	4,13	2,88	7,30	48,49	2,88	17,09	7,03	1,11	2,44
18-B- VV/12	15,25 (267,75)	286	2,55	3,42	13,55	82,50	8,04	27,15	16,4	1,33	2,04
18-B- VV/11	15,4 (267,6)		3,92	3,23	8,94	61,03	2,18	19,10	8,35	0,71	3,83
18-B- VV/9	15,7 (267,3)	83	1,97	2,37	4,09	23,64	2,01	14,04	4,01	1,36	2,00
18-B- VV/8	15,85 (267,15)	167	4,78	3,01	10,01	50,62	3,56	29,42	7,97	1,21	2,24
18-B- VV/7	16,05 (266,95)		2,61	4,11	7,02	50,60	2,72	35,78	4,37	1,69	1,61
18-B- VV/5	16,35 (266,65)	115	4,10	2,09	7,00	44,47	2,96	17,87	8,23	0,97	2,78
18-B- VV/3	16,65 (266,35)		5,34	3,03	8,93	52,90	3,72	16,13	9,43	1,07	2,53
18-B- VV/1	17,0 (266,0)		4,93	6,82	6,13	40,80	10,6	26,28	7,30	3,94	0,69
Среднее значение			2,89	2,02	6,32	38,16	2,64	14,46	6,35	1,18	2,84

Таблица 2. Ионный состав позднеплейстоценового повторно-жильного льда, ПЖЛ-7, Батагайская едома

67°34' 56" с.ш., 134°46' 53" в.д. (№71-150) отбор льда с гл. 1-12,8 м (239-227,2 м абс. выс.)

Полевой номер образца	Глуб., м (абс. выс., м)	ЕС, мсм	Na ⁺ , мг/л	K ⁺ , мг/л	Mg ²⁺ , мг/л	Ca ²⁺ , мг/л	Cl ⁻ , мг/л	NO ₃ ⁻ , мг/л	SO ₄ ²⁻ , мг/л	Cl ⁻ моль/ SO ₄ ²⁻ моль	SO ₄ ²⁻ / Cl ⁻
18-B- VV/71	1 (239)	296	4,00	2,67	8,12	52,05	2,65	18,57	6,72	1,06	2,54
18-B- VV/72	1,1 (238,9)	165	3,90	1,58	8,33	36,12	2,05	14,07	6,65	0,83	3,24
18-B- VV/74	1,43 (238,57)	111	2,24	1,87	4,02	24,31	2,77	12,62	4,80	1,56	1,73
18-B- VV/75	1,58 (238,42)	99	2,14	1,44	3,30	25,70	1,56	8,30	3,50	1,20	2,24
18-B- VV/77	1,9 (238,1)	126	1,51	3,51	4,11	39,85	1,82	11,51	4,65	1,05	2,55
18-B- VV/79	2,18 (237,82)	159	3,90	2,90	7,95	45,51	2,60	14,90	7,23	0,97	2,78

10-0-	2,0										2,06	1,31
VV/81	(237,5)	87	1,43	2,02	2,67	17,39	1,61	8,01	2,11			
18-B-	3,08										1,38	1,95
VV/85	(236,92)	101	1,44	2,15	3,61	16,76	1,54	11,93	3,01			
18-B-	3,2										1,00	2,68
VV/86	(236,8)	88	0,68	2,03	3,52	19,48	1,33	10,43	3,57			
18-B-	3,5										1,80	1,49
VV/88	(236,5)		1,82	1,38	6,01	40,70	1,48	9,82	2,21			
18-B-	3,8										0,79	3,42
VV/90	(236,2)	107	1,07	1,65	3,43	26,44	1,48	11,55	5,06			
18-B-	4,4										0,93	2,90
VV/94	(235,6)	125	1,30	1,34	6,17	40,60	1,73	7,78	5,02			
18-B-	4,9										0,96	2,80
VV/97	(235,1)	141	1,87	2,68	5,94	36,32	1,84	11,85	5,15			
18-B-	5,3										0,90	2,99
VV/100	(234,7)	151	1,42	2,56	8,47	50,01	2,13	11,82	6,36			
18-B-	5,9										1,14	2,37
VV/104	(234,1)	120	1,65	2,60	5,30	30,28	1,83	8,04	4,33			
18-B-	6,2										1,05	2,57
VV/106	(233,8)	107	1,78	1,94	4,36	24,38	2,14	10,75	5,51			
18-B-	6,8										1,36	1,99
VV/110	(233,2)	127	1,68	2,58	5,29	27,10	2,54	10,47	5,05			
18-B-	7,1										2,42	1,11
VV/112	(232,9)	142	1,82	5,62	3,72	34,80	4,54	4,97	5,06			
18-B-	7,4										1,29	2,09
VV/114	(232,6)	90	0,70	2,70	3,06	19,23	1,94	20,42	4,05			
18-B-	7,6										2,55	1,06
VV/115	(232,4)		0,86	2,85	3,65	19,75	1,54	8,37	1,63			
18-B-	7,9										1,07	2,52
VV/117	(232,1)	71	0,64	1,82	2,81	17,01	1,38	7,32	3,48			
18-B-	8,3										0,77	3,51
VV/120	(231,7)	91	1,01	2,14	4,20	23,01	1,46	8,85	5,13			
18-B-	8,5										1,90	1,42
VV/121	(231,5)		0,63	1,80	3,24	21,58	1,13	6,97	1,60			
18-B-	8,9										0,59	4,54
VV/124	(231,1)	133	1,29	2,86	9,60	48,40	1,53	7,32	6,94			
18-B-	9,1										0,09	28,9
VV/125	(230,9)	99	0,92	2,20	4,01	24,51	1,40	6,70	40,5			
18-B-	9,2										3,03	0,89
VV/126	(230,8)		0,70	2,07	3,27	22,40	1,55	7,23	1,38			
18-B-	9,4										0,77	3,49
VV/127	(230,6)	80	0,80	1,78	3,77	24,95	1,66	8,50	5,80			
18-B-	9,8										0,50	5,42
VV/130	(230,2)	131	1,48	2,48	8,94	55,02	1,86	10,23	10,1			
18-B-	10,1										0,72	3,73
VV/132	(229,9)	101	1,32	2,21	5,72	40,92	1,93	11,86	7,19			
18-B-	10,9										0,97	2,77
VV/137	(229,1)	129	1,62	3,37	5,07	33,63	2,55	11,36	7,07			
18-B-	11,3										0,78	3,44
VV/140	(228,7)	98	1,32	2,93	4,45	23,81	1,51	7,77	5,20			

18-B-VV/143	11,8 (228,2)	87	1,60	1,46	4,04	23,31	1,15	6,93	4,21	0,74	3,66
18-B-VV/145	12,1 (227,9)	122	1,41	3,45	6,68	46,70	2,16	11,19	6,76	0,86	3,13
18-B-VV/148	12,5 (227,4)	171	0,93	4,42	6,04	43,14	3,78	54,76	5,46	1,87	1,44
18-B-VV/149	12,7 (227,3)	97	0,45	1,06	2,43	12,01	1,38	10,55	1,49	2,50	1,08
18-B-VV/150	12,8 (227,2)	129	1,01	3,48	4,30	28,00	3,18	35,39	4,54	1,89	1,43
Среднее значение			1,51	2,43	4,99	30,98	1,96	12,20	5,79	1,26	3,26

Содержание анионов SO_4^{2-} и Cl^- . В ПЖЛ-5 Батагайской едомы содержание SO_4^{2-} изменяется от 2 до 17 мг/л, составляя в среднем 6,35 мг/л, содержание Cl^- изменяется от 1,08 до 7 мг/л, составляя в среднем 2,6 мг/л (рис. 8). В ПЖЛ-7 Батагайской едомы содержание SO_4^{2-} изменяется от 1,4 до 40,5 мг/л, составляя в среднем 6,35 мг/л (рис. 9), содержание Cl^- изменяется от 1,13 до 4,5 мг/л, составляя в среднем 1,96 мг/л (см. табл. 1, 2).

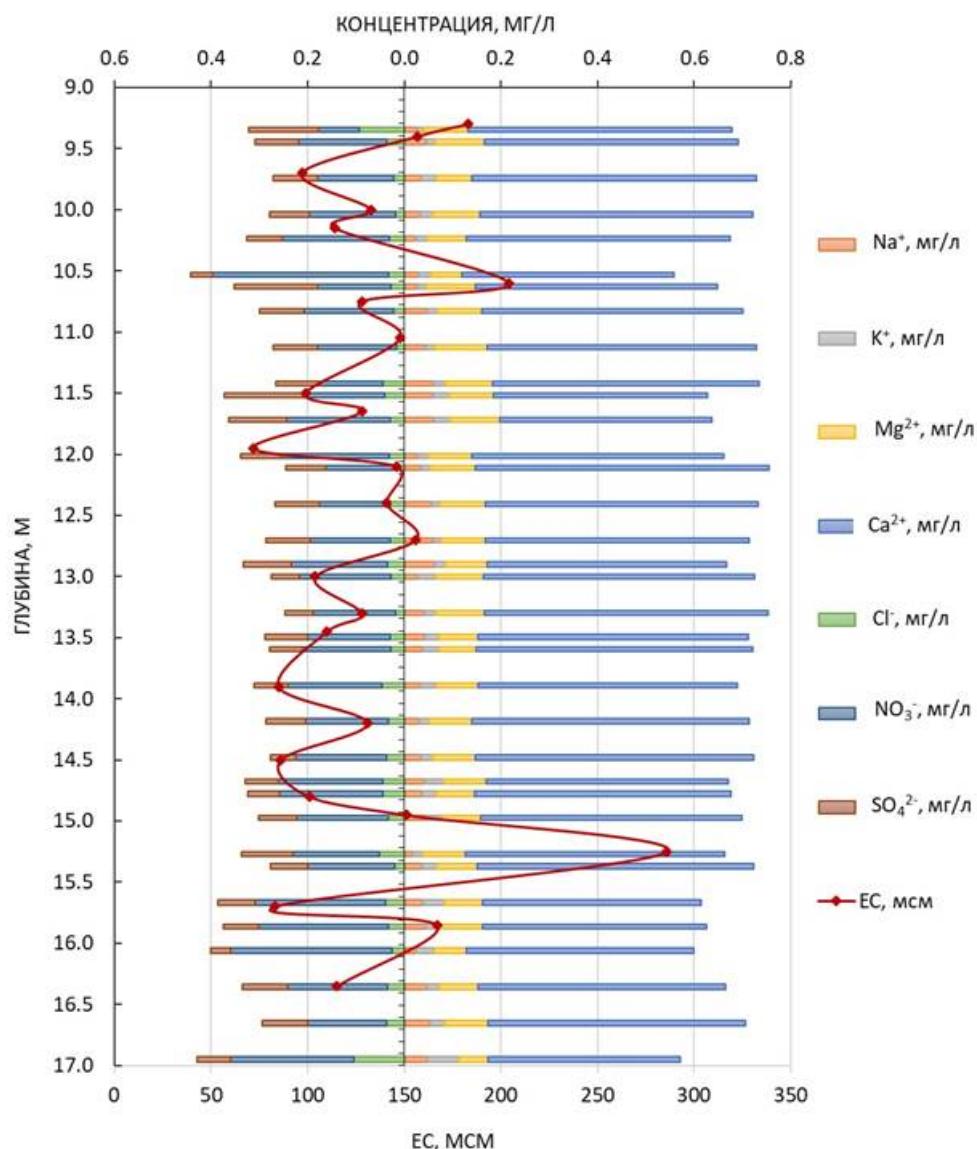


Рис. 8. Ионный состав позднеплейстоценового повторно-жильного льда, ПЖЛ-5, Батагайская едома ($67^{\circ}34' 56''$ с.ш., $134^{\circ}46' 53''$ в.д.)

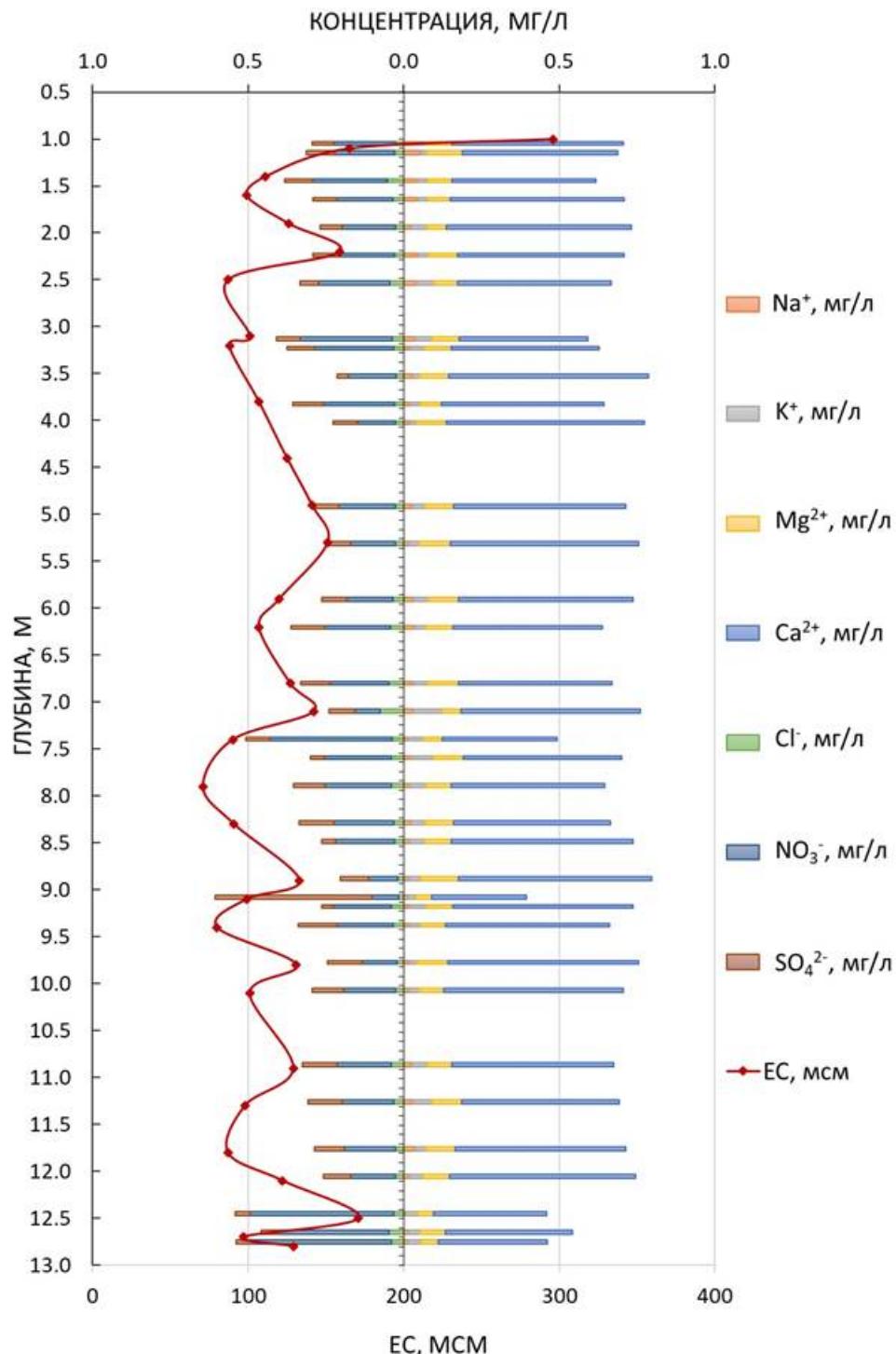


Рис. 9. Ионный состав позднеплейстоценового повторно-жильного льда, ПЖЛ-7, Батагайская едома ($67^{\circ}34' 56''$ с.ш., $134^{\circ}46' 53''$ в.д.)

Дискуссия

Радиоуглеродный возраст ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7

Радиоуглеродное AMS датирование выполненное авторами непосредственно по органическим микровключениям из ряда ПЖЛ Батагайской едомы, продемонстрировало, что время образования ПЖЛ-5 датируется периодом от 48,1 до 44,9 тыс. калибр. лет назад, а ПЖЛ-7 – от 48,9 до 46,2 тыс. калибр. лет назад. [16-18]

Ионный состав

Ранее исследовавшиеся нами^[11] тем же методом ПЖЛ в низовьях Колымы (пос. Черский) и р. Мал. Ануй (Станчиковский Яр) продемонстрировали несколько меньшую концентрацию сульфатов (в среднем 1,2 - Черский и 2,6 мг/л - Станчиковский) и хлоридов (в среднем 1,8 - Черский и 2,6 мг/л - Станчиковский)

В ПЖЛ Черской едомы содержание SO_4^{2-} изменяется от 2,1 до 3,1 мг/л, составляя в среднем 2,6 мг/л; содержание Cl^- изменяется от 0,4 до 3,9 мг/л, составляя в среднем 1,2 мг/л .^[11]

Исследованные нами в Батагайской едоме две рядом расположенные ледяные жилы ПЖЛ-17 и ПЖЛ-20^[10] также относятся к ультрапресным льдам с концентрацией основных ионов от 20 до 40 мг/л. Но, в ионном составе повторно-жильного льда ПЖЛ-17 заметно преобладают катионы натрия и кальция, достигая в одном из образцов 24,15 и 53,16 мг/л соответственно. В этом же образце анионы хлора достигают 34,51 мг/л. Средняя концентрация анионов сульфатов составляет - 2-3 мг/л. В ионном составе повторно-жильного льда ПЖЛ-20 заметно преобладают катионы натрия и кальция, достигая в одном из образцов 7,27 и 50,0 мг/л соответственно. В этом же образце анионы хлора достигают 13,72 мг/л. Средняя концентрация анионов сульфатов составляет - 2-4 мг/л, достигая 22,24 мг/л. Содержание катионов кальция составляет 6-20 мг/л (редко достигая 42-53 мг/л); Концентрация катионов калия составляет 0,7-3 мг/л. Заметно присутствие нитрат анионов в составе ПЖЛ-17, составляя в основном 4-7 мг/л в экстремуме NO_3^- достигает 16 и даже 26 мг/л на глубине 12,5 м. В составе ПЖЛ-20, нитрат анионы составляют в основном 6-8 мг/л и достигают на глубине 7-8 м - 13 мг/л.

Согласно данным К. Кэмпбел-Хитон^[13] на территории Юрика-Саунд и фьорда Мокка (рис. 10) в разрезе EU18-W1: содержание SO_4^{2-} изменяется от 46 до 127 мг/л, содержание Cl^- изменяется от 14 до 71 мг/л; в разрезе EU18-W2: содержание SO_4^{2-} изменяется от 27 до 63 мг/л, содержание Cl^- изменяется от 104 до 427 мг/л; в разрезе EU18-W3: содержание SO_4^{2-} изменяется от 32 до 83 мг/л, содержание Cl^- изменяется от 14 до 55 мг/л; а в Нунаувуте - в разрезе EU18-W4: содержание SO_4^{2-} изменяется от 8 до 29 мг/л, содержание Cl^- изменяется от 9 до 20 мг/л; в разрезе EU18-W5: содержание SO_4^{2-} изменяется от 17 до 44 мг/л, содержание Cl^- изменяется от 12 до 33 мг/л .^[13, р. 103]



Рис. 10. Ледяные жилы отбирающиеся на территории низменности Юрика-Саунд и фьорда Мокка. (а) обнажение Блэктоп, EU18-W1, (б) обнажение Блэктоп, EU18-W2, (в) обнажение Нунавута, EU19-W4, (г) обнажение Нунавута, EU19-W5, (д) обнажение фьорда Мокка, MF-W1 to W3. Из K.Campbell-Heaton [13]

Отношение $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$

В ПЖЛ-5 Батагайской едомы отношение $\text{Cl}/\text{SO}_4^{2-}$ варьирует от 0,16 до 1,45 составляя в среднем 0,44; в ПЖЛ-7 Батагайской едомы отношение $\text{Cl}/\text{SO}_4^{2-}$ варьирует от 0,04 до 1,12, составляя в среднем 0,47.

В ПЖЛ-17 Батагайской едомы отношение $\text{Cl}/\text{SO}_4^{2-}$ варьирует от 0,18 до 2,31, составляя в среднем 0,57; в ПЖЛ-20 Батагайской едомы отношение $\text{Cl}/\text{SO}_4^{2-}$ варьирует от 0,45 до 0,93, составляя в среднем 0,62. [10]

Сравнивая эти данные с рассчитанные нами [26] соотношениями хлоридов и сульфатов в подземных льдах и поверхностных водах на севере Западной Сибири (табл. 3) отметим, что по соотношению $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ они ближе всего к снежникам на севере Ямала в долине р.Сеяха (Мутная), где соотношение $\text{Cl}/\text{SO}_4^{2-} = 0,54$, к дождовым водам на Ямале где соотношение $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} = 1,44$, к сегрегационному льду на первой террасе о.Белый, где соотношение $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} = 1,08$. Отношение $\text{Cl}/\text{SO}_4^{2-}$ в ПЖЛ-5 и в ПЖЛ-7 резко контрастирует с криопэгами (соотношение 49,45), большинством пластовых льдов Ямала (68,91; 26,39; 9,77 и т.п.).

Таблица 3 . Соотношение хлоридов и сульфатов в подземных льдах и возможных источниках поступления воды в них, север Западной Сибири (по [26])

Объект	Концентрация анионов, мг/л	Соотношение

	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻
Лед коричневый, скв. 12, обр 8	70,61	7,23	9,77
Лед коричневый, скв. 12, обр 9	75,8	1,1	68,91
Лед белый, скв. 17, обр. 38	55,67	11,25	4,95
Лед белый, скв. 17, обр.39	55,61	16,92	3,29
Лед коричневый вертикальнослоистый, скв. 42	34,53	35,92	0,96
Сегрегационный лед на первой террасе о.Белый	14,2	13,2	1,08
Пластовый лед третья морская терраса, р.Надуйяха	24	17	1,41
Атмосферные осадки на севере Ямала	7	9	0,78
Речная вода, р. Сеяха Мутная	12	10	1,2
Снежник на севере Ямала - долина р.Сеяха (Мутная)	7	13	0,54
Криопэг в долине р.Надуйяха	37778	764	49,45
Пресный пластовый лед на Ямале, средний состав	62,4	6,2	10,06
Вода Карское море	89	10	8,9
Солоноватый пластовый лед на Ямале, средний состав	95,0	3,6	26,39
Подрусловые талики рек бассейна Обской губы	83	3	27,67
Ультрапресный пластовый лед на Ямале, средний состав	36,9	12,6	2,93
Снег на Ямале	45,5	6,8	6,69
Озерные воды	39,8	5,3	7,51
Текстурообразующие льды	54,2	12,6	4,30
Речные воды бассейна рек Карского моря	64,4	13,8	4,67
Речные воды	25,6	11,8	2,17
Дождь на Ямале	32,6	18,7	1,74
Вода, Обская губа	27	32	0,84
Инъекционные льды	31,4	20,2	1,55
Дождевые осадки на Ямале	32,6	18,7	1,74

В жилах едомы Станчиковского Яра отношение Cl/SO₄²⁻ варьирует от 0,57 до 2,90 составляя в среднем 1,08.^[11] В ПЖЛ едомы близ пос.Черский отношение Cl/SO₄²⁻ варьирует от 0,52 до 1,11, составляя в среднем 0,69. В воде рек Малый Анюй и Колыма отношение Cl⁻/SO₄²⁻ составляет 0,01.^[11]

Согласно данным К. Кэмпбел-Хитон (Campbell-Heaton, 2020) отношение Cl/SO₄²⁻ в ПЖЛ в районе Юрика Саунд варьирует в разрезе EU18-W1 от 0,19 до 1,30, в разрезе EU18-W2 от 1,54 до 6,75.

Этому не противоречат и материалы, приведенные в работе А.В.Салтыкова и др.^[27],

посвященной рассмотрению ионного состава снежного покрова на территории Сибири и Дальнего Востока, показавших, что снеговые талые воды, образующиеся при таянии снежного покрова в труднодоступных ландшафтах Северной Азии, относятся к ультрапресным кислым, слабокислым и нейтральным. При этом в ионном составе снежного покрова Северной Азии в течение всего периода наблюдений преобладали ионы HCO_3^- , даже вблизи морских побережий, где происходит интенсивное поступление в атмосферу анионов SO_4^{2-} и Cl^- . Минерализация снежного покрова во многих мониторинговых регионах по материалам А.В.Салтыкова и др.[\[27\]](#) находится приблизительно на одном уровне (от 10 до 35 мг/л). Исключение среди них – Иолго-Сумультинский и Абакано-Шапшальский районы, где обнаружены высокие значения этого показателя (61 и 42 мг/л соответственно). Относительно повышенная минерализация снега высокогорных регионов, связана с тем, что здесь в зимнее время часто встречаются оголённые участки коренных пород, способствующие увеличению пылевой нагрузки на снежный покров. Вполне вероятно, что формирование повторно-жильных льдов ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7 Батагайской едомы также происходило в отдельные моменты при заметном увеличении привноса пыли на поверхность снежного покрова.

Заключение

1. Минерализация позднеплейстоценовых повторно-жильных льдов ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7 Батагайской едомы варьирует от 66,56 до 424,8 мг/л, от ультрапресной до опресненной, по ионному составу лёд гидрокарбонатно-кальциевый и соответствуют снегу, сформированному под воздействием континентальных солей.
2. В растворенной форме в изученных ПЖЛ среди катионов доминирует Ca^{2+} (ПЖЛ-5 от 17,8 до 82,5 мг/л, ПЖЛ-7 от 12,0 до 52,1 мг/л), на втором месте Mg^{2+} (ПЖЛ-5 от 3,1 до 13,6 мг/л, ПЖЛ-7 от 2,6 до 8,3 мг/л).
3. Na^+ и K^+ содержатся в растворенной форме в меньших количествах: Na^+ – ПЖЛ-5 от 0,8 до 6,8 мг/л, ПЖЛ-7 от 0,45 до 4,0 мг/л, а K^+ – ПЖЛ-5 от 17,8 до 82,5 мг/л, ПЖЛ-7 от 1,1 до 5,6 мг/л.
4. Среди анионов превалируют нитраты (NO_3^-): ПЖЛ-5 от 6,9 до 27,9 мг/л, ПЖЛ-7 от 5,0 до 54,8 мг/л, среднее содержание NO_3^- : ПЖЛ-5 14,5 мг/л, ПЖЛ-7 12,2 мг/л.
5. ПЖЛ-5 Батагайской едомы содержание SO_4^{2-} изменяется от 2 до 17 мг/л, составляя в среднем 6,35 мг/л, содержание Cl^- изменяется от 1,08 до 7 мг/л, составляя в среднем 2,6 мг/л. В ПЖЛ-7 Батагайской едомы содержание SO_4^{2-} изменяется от 1,4 до 40,5 мг/л, составляя в среднем 5,79 мг/л, содержание Cl^- изменяется от 1,13 до 4,5 мг/л, составляя в среднем 1,96 мг/л
6. В ПЖЛ-5 Батагайской едомы отношение $\text{Cl}/\text{SO}_4^{2-}$ варьирует от 0,16 до 1,45 составляя в среднем 0,44; в ПЖЛ-7 Батагайской едомы отношение $\text{Cl}/\text{SO}_4^{2-}$ варьирует от 0,04 до 1,12, составляя в среднем 0,47.
7. Ионный состав льда ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7 Батагайской едомы указывает на образование их при заполнении морозобойных трещин водой из снега, сформировавшегося под воздействием континентальных воздушных масс.

8. В отдельные периоды формирование повторно-жильных льдов ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7 Батагайской едомы происходило при заметном увеличении привноса пыли на поверхность снежного покрова.

Благодарности

Автор выражает благодарность Л. В. Добрыниной за выполнение хроматографического анализа ионного состава льдов, А. Ю. Тришину за помощь при проведении полевых работ, а также Л.Б. Блудушкиной за участие в оформлении работы.

Библиография

1. Alexeev S. V., Alexeeva L.P., Ground ice in the sedimentary rocks and kimberlites of Yakutia, Russia. *Permafrost. Periglac. Process.* 2002. Vol. 13. Pp. 53–59. doi:10.1002/ppp.408.
2. Alexeev, S.V., Alexeeva, L.P., Kononov, A.M., Trace elements and rare earth elements in ground ice in kimberlites and sedimentary rocks of Western Yakutia. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2016. Vol. 123. Pp. 140–148. doi:10.1016/J.COLDREGIONS.2015.10.008.
3. Иванова В.В. Геохимия пластовых льдов острова Новая Сибирь (Новосибирские острова, Российская Арктика) как отражение условий их генезиса // *Криосфера Земли*. 2012. Том XVI. №1. С. 56–70.
4. Опокина О.Л., Слагода Е.А., Стрелецкая И.Д., Суслова М.Ю., Томберг И.В., Ходжер Т.В. Криолитология, гидрохимия и микробиология голоценовых озерных и повторно-жильных льдов о-ва Сибириакова Карского моря // *Природа шельфов и архипелагов Европейской Арктики*. Вып. 10, М.: ГЕОС, 2010. С. 241–247.
5. Опокина, 2014 Опокина О.Л., Слагода Е.А., Томберг И.В., Суслова М.Ю., Фирсова А.Д., Ходжер Т.В., Жученко Н.А. колебания уровня моря и их отражение в составе и строении полигонально-жильных льдов в низовьях Енисея // *Лёд и Снег*. 2014. Том 54(2). С. 82–90. doi: 10.15356/2076-6734-2014-2-82-90.
6. Vasil'chuk Yu.K., Trofimov V.T. Cryohydrochemical peculiarities of ice-wedge complexes in the north of Western Siberia // *Permafrost. Fourth International Conference, Proceedings*. Fairbanks. Alaska. National Academy Press. Washington, 1983. P. 1303–1308.
7. Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций). М.: Изд. Отдел. Теоретических проблем РАН. МГУ, ПНИИС. 1992. В 2-х томах. Т. 1. – 420 с. Т. 2 – 264 с.
8. Васильчук Ю.К., Васильчук Д.Ю., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Гинзбург А.П. Геохимический состав повторно-жильных льдов в Батагайской едоме // Арктика и Антарктика. 2021. № 2. С. 70-92. DOI: 10.7256/2453-8922.2021.2.35962 URL: https://e-notabene.ru/arctic/article_35962.html
9. Vasil'chuk, Yu.K., Vasil'chuk, J.Yu., Budantseva, N.A., Vasil'chuk, A.C., Belik, A.D., Bludushkina, L.B., Ginzburg, A.P., Krechetov, P.P., Terskaya, E.V. Major and trace elements, δ13C, and polycyclic aromatic hydrocarbons in the Late Pleistocene ice wedges: A case-study of Batagay yedoma, Central Yakutia. *Applied Geochemistry*. 2020. Vol. 120. 104669. doi: 10.1016/j.apgeochem.2020.104669.
10. Васильчук Ю.К. Ионный состав повторно-жильных льдов №17 и №20 Батагайской едомы // Арктика и Антарктика. 2024. № 3. С. 65-90. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.3.71272 EDN: QWEIZV URL: https://e-notabene.ru/arctic/article_71272.html
11. Буданцева Н.А., Васильчук Ю.К. Геохимический состав голоценовых и позднеплейстоценовых повторно-жильных льдов в едомных толщах Станчиковского Яра и у пос. Черский, северная Якутия // Арктика и Антарктика. 2021. № 1. С. 65-79. DOI: 10.7256/2453-8922.2021.1.35361 URL: https://e-notabene.ru/arctic/article_35361.html
12. Iizuka Y., Miyamoto C., Matoba S., Iwahana G., Horiuchi K., Takahashi Y., Kanna N., Suzuki K., Ohno H., Ion concentrations in ice wedges: An innovative approach to reconstruct

- past climate variability. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2019. Vol. 515. Pp. 58–66. doi:10.1016/j.epsl.2019.03.013
13. Campbell-Heaton K. *Ice wedge activity in the Eureka Sound Lowlands, Canadian High Arctic*. A thesis submitted to the University of Ottawa in partial fulfillment of the requirements for the Master of Science in Geography. Department of Geography, Environment and Geomatics. Faculty of Arts. CryoLab for Arctic, Antarctic and Planetary Studies (CLAAPS). University of Ottawa, 2020. 103 p.
14. Vadakkedath V., Zawadzki J. & Przeździecki K. Multisensory satellite observations of the expansion of the Batagaika crater and succession of vegetation in its interior from 1991 to 2018 // *Environ Earth Sci.* 2020. Vol. 79. 150. doi:10.1007/s12665-020-8895-7
15. Ashastina K, Schirrmeyer L, Fuchs M, Kienast F. Palaeoclimate characteristics in interior Siberia of MIS 6-2: first insights from the Batagay permafrost mega-thaw slump in the Yana Highlands // *Climate of the Past*. 2017. Vol. 13. Pp. 795–818. doi:10.5194/cp-13-795-2017.
16. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk J.Yu. The first AMS dating of organic matter microinclusions in an ice wedge of the upper part of the Batagay yedoma megaslump (Yakutia) // *Doklady Earth Sciences*. 2019. Vol. 489, Part 1. Pp. 1318–1321. doi:10.1134/S1028334X19110096.
17. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk J.Yu., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C. New AMS dates of organic microinclusions in ice wedges of the lower part of Batagay yedoma, Yakutia // *Doklady Earth Sciences*. 2020. Vol. 490. Part 2. Pp. 100–103. doi:10.1134/S1028334X20020154
18. Vasil'chuk Yu K., Vasil'chuk J.Yu, Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C. (). MIS 3-2 paleo-winter temperature reconstructions obtained from stable water isotope records of radiocarbon-dated ice wedges of the Batagay Ice Complex (Yana Upland, eastern Siberia) // *Radiocarbon*. 2022. Vol. 64. № 6. Pp. 1403–1417. doi:10.1017/RDC.2022.60.
19. Справочник по климату СССР. Вып. 24. Якутская АССР. Часть 2. Температура воздуха и почвы. 1966. Л. Гидрометеоиздат. 403 с.
20. ru.climate-data.org
21. Исаченко А.Г. Ландшафты СССР Л.: Изд-во ЛГУ, 1985. 320 с.
22. Pesterev A.P., Vasilyeva A.I., Ammosova M.N., Sobolev D.B. Unexplored soils of the Western Yakutia // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 463. 022001. doi:10.1088/1757-899X/463/2/022001.
23. IUSS Working Group WRB Update 2015. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soil and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO. Rome, 181 p.
24. Саввинов Г.Н., Данилов П.П., Петров А.А., Макаров В.С., Боецков В.С., Григорьев С.Е. Экологические проблемы Верхоянского района // *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*, 2018, № 6 (68). С. 18–33.
25. Геологическая карта Q-53-III, IV (м-ба 1:200 000). ВСЕГЕИ им. Карпинского, 2018. Geological map Q-53-III, IV (scale 1:200 000). VSEGEI named after Karpinsky, 2018.
26. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Подборный Е.Е., Чижова Ю.Н. Пластовые льды в голоценовых отложениях Западной Сибири // *Криосфера Земли*. 2016. №1. С. 36–50.
27. Салтыков А. В., Балыкин С. Н., Балыкин Д. Н., Горбачев И. В. Ионный состав снежного покрова на территории Сибири и Дальнего Востока // *Лед и снег*. 2024. №2. С. 262–272. doi: 10.31857/S2076673424020092.

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предметом исследования в данной работе является изучение ионного состава в ледяных жилах ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7 Батагайской едомы. Автором была поставлена цель исследований - изучить состав ионов во льду повторно-жильных льдов №5 и №7 Батагайской едомы, чтобы определить главный источник образования льда.

Методология исследования основана на геолого-полевой разведке и отборе образцов льда для дальнейшего лабораторно-химического анализа. Образцы льда отбирались из ледяных жил по вертикали через каждые 10 см с помощью дрелей Makita DDF481RTE 18В и Bosch GSR 36 VE-2-LIc стальными коронками для льда диаметром 51 мм. Масса каждого образца составляла около 150 г, образцы упаковывались в полиэтиленовые пакеты. Отбор льда сопровождался подробным описанием цвета, прозрачности, структуры, толщины ледяных и грунтовых прожилок, включений, формы и размера ксенолитов, пузырьков воздуха. Координаты разрезов регистрировались с помощью GPS. Образцы для ^{14}C датирования вырубались из ледяных жил при помощи топора, масса каждого образца составляла не менее 0,5-1 кг. Вырубленный лёд упаковывался в пластиковые пакеты. Лёд растапливался в пакетах при температуре +20°C. Каждый образец талой ледяной воды делился на 2 равные части – фильтрованную и нефильтрованную. Затем талая вода переливалась в пластиковые флаконы ёмкостью 10 мл с плотно закрывающейся крышкой. Измерения макрокомпонентного состава льда проводились с помощью ионного хроматографа «Стайер», который предназначен для качественных и количественных определений неорганических соединений F^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} и Ca^{2+} в водных растворах различного происхождения (природных, технических, питьевых). Изучен ионный состав жильного льда, вскрытого в Батагайском овраге в 35 образцах из - ПЖЛ 5 и 36 образцах из - ПЖЛ 7.

Актуальность. Автор статьи отмечает, что макроэлементный состав подземных льдов формируется при совокупном влиянии ионного состава вод, сформировавших эти льды, и макрокомпонентного состава вмещающих льды отложений. Это определяет актуальность проводимых исследований, так как макроэлементный состав может быть использован в качестве индикатора смены геохимических условий миграции и аккумуляции химических элементов, происходящей в результате смены ландшафтных условий льдообразования в условиях Батагайской едомы.

Научная новизна заключается в том, что автор впервые проводит изучение ионного состава в ледяных жилах ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7 Батагайской едомы.

В рецензируемой статье приведены результаты глубокого исследования ионного состава льда и содержания макроэлементов в составе талой воды ПЖЛ 5 и 7 что, несомненно, является достоинством данной работы.

Стиль статьи - научный, соответствует установленным требованиям журнала. Структура статьи включает в себя введение, результаты и обсуждение, заключение, библиографию. Содержание научной статьи полностью раскрывает ее тему, выводы доказательны и обоснованы. Текст написан научным языком, статья соответствует объёму, согласно требованиям журнала.

Однако имеются технические опечатки, например в 1-ом пункте заключения: «....по ионному составу лёд гидрокарбонатно-кальциевый и соответствуют снегу». Нужно писать «соответствует снегу».

Библиография статьи обширна, включает в себя 27 литературных источников, в том числе 13 - на иностранном языке. В тексте имеются корректные ссылки на используемые литературные источники. Автору следует обратить внимание на оформление библиографического списка, привести его в соответствие с требованиями журнала. Например, в библиографии ссылка на 20-й источник сделана не по ГОСТу.

Выводы в статье достаточной степени аргументированы, обоснованы, исчерпывающи. Автором установлено, что минерализация повторно-жильных льдов ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7 Батагайской едомы варьирует от 66,56 до 424,8 мг/л, от ультрапресной до опресненной, по ионному составу лёд гидрокарбонатно-кальциевый и соответствует снегу. В растворенной форме в изученных ПЖЛ среди катионов доминирует Ca^{2+} (ПЖЛ-5 от 17,8 до 82,5 мг/л, ПЖЛ-7 от 12,0 до 52,1 мг/л), на втором месте Mg^{2+} (ПЖЛ-5 от 3,1 до 13,6 мг/л, ПЖЛ-7 от 2,6 до 8,3 мг/л).

Рецензируемая работа бесспорно имеет практическую значимость. Автору удалось установить, что ионный состав льда ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7 Батагайской едомы указывает на образование их при заполнении морозобойных трещин водой из снега, сформировавшегося под воздействием континентальных воздушных масс. Это очень важно с точки зрения практического применения результатов исследований.

Апелляция к оппонентам состоит в ссылках на использованные литературные источники и выражении авторского мнения по изучаемой проблеме.

Рецензируемая статья несомненно будет интересна и полезна грунтоведам, мерзлотоведам, студентам и аспирантам, обучающимся по направлению 1.6.7. «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение».

Данная статья заслуживает внимания научного сообщества, рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика».