

Арктика и Антарктика*Правильная ссылка на статью:*

Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Васильчук Д.Ю., Слышикина Е.С., Гинзбург А.П. Изотопная и геохимическая характеристика песчано-ледяных жил из толщи Батагайского нижнего песка // Арктика и Антарктика. 2025. № 4. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.4.76842 EDN: QHRVKZ URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=76842

Изотопная и геохимическая характеристика песчано-ледяных жил из толщи Батагайского нижнего песка

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

Буданцева Надежда Аркадьевна

ORCID: 0000-0003-4292-5709

кандидат географических наук

старший научный сотрудник; кафедра геохимии ландшафтов и географии почв; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 2007



✉ nadin.budanceva@mail.ru

Васильчук Алла Константиновна

доктор географических наук

ведущий научный сотрудник; лаборатория геэкологии Севера, географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. Ж10



✉ alla-vasilch@yandex.ru

Васильчук Джессика Юрьевна

кандидат географических наук

младший научный сотрудник; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв

119991, Россия, Leninsky Gory область, г. Moscow, ул. Leninsky Gory, 1, оф. 2007

✉ jessica.vasilchuk@gmail.com

**Слышикина Елена Сергеевна**

младший научный сотрудник; лаборатория геэкологии Севера; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Начальник лаборатории; АО "Атомэнергопроект" 119234; Россия; г. Москва; ул. Подольских Курсантов; 1; оф. 250

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. ж10

✉ lena.slyshkina@gmail.com



Гинзбург Александр Павлович

младший научный сотрудник; Научно-исследовательская лаборатория геоэкологии Севера;
 Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
 младший научный сотрудник; Лаборатория криологии почв; Институт физико-химических и
 биологических проблем почвоведения ИФХБП РАН; Пущино; Россия

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 2007

✉ alexandrginzburg13154@yandex.ru



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

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.4.76842

EDN:

QHRVKZ

Дата направления статьи в редакцию:

19-11-2025

Аннотация: Объектом исследования являются песчано-ледяные жилы из толщи Батагайского нижнего песка, и прежде всего их изотопно-geoхимическая характеристика. Цель данной работы – охарактеризовать изотопно-geoхимические особенности композитных песчано-ледяных жил (ПЛЖ) в толще нижнего песка, сравнить их с аналогичными жилами в толще верхнего горизонта песка. Отбор образцов льда из нижних горизонтов Батагайской толщи весьма затруднен из-за активного обрушения грунтов сверху в результате таяния сильнольдистых отложений и падения их с высоты 50–70 м. Отбор образцов льда из композитных ПЛЖ, вскрываемых в нижнем песке Батагайского разреза, производился 14 августа 2019 гг. Образцы льда отбирались по вертикали через каждые 10–20 см с помощью электродрелей Makita DDF481re 18В и Bosch GSR 36 VE-2-LI со стальными коронками для льда диаметром 51 мм. Макрокомпонентный состав льда ПЛЖ измерялся с помощью ионного хроматографа «Стайер». Измерения изотопного состава кислорода и дейтерия во льду ПЛЖ были выполнены в лаборатории стабильных изотопов географического факультета МГУ на масс-спектрометре Delta-V Plus с использованием комплекса газ-бенч. Проведена проверка нормальности распределения с помощью теста Шапиро-Уилка, t-критерия Уэлча, U-критерия Манна-Уитни. Для льда ПЛЖ получены в целом довольно низкие значения изотопного состава. Значения δ¹⁸O варьируют от -36,09 до -32,32‰, значения δ²H – от -257,1 до -230,1‰, при этом для всех образцов льда получены очень высокие значения d_{exs} – от 22,5 до 42,4‰. Средние значения минерализации песчано-ледяных жилах нижнего песка имеет 332 мг/л, среди катионов преобладают кальций, в среднем составляя 66–97 мг/л, а среди анионов сульфаты, среднее значение – 144–273 мг/л. Наибольший разброс среди катионов отмечен для магния (2–255 мг/л), а среди анионов для нитратов (0,1–111,7 мг/л). Высказано предположение о существенной генетической и, возможно, хронологической близости песчано-ледяных жил нижнего и верхнего песка Батагайского термоцирка.

Ключевые слова:

стабильные изотопы, кислород, дейтерий, ионы, песчано-ледяные жилы, Батагай, поздний плейстоцен, верхний песок, нижний песок, многолетнемерзлые породы

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда (грант № 23-17-00082 «Палеоциклы углерода-азота в экосистемах бугристых и полигональных торфяников, едомы и в пластовых льдах на севере России») – изотопные определения, геохимические определения выполнены в рамках государственного задания МГУ им.М.В.Ломоносова” (The study was conducted under the state assignment of Lomonosov Moscow State University).

Введение

Батагайский термоцирк ($67,58^{\circ}$ с.ш., $134,77^{\circ}$ в.д.), расположенный на правом берегу р.Яны, недалеко от пос. Батагай является самой большой в мире термоденудационной котловиной (рис. 1). Он расположен в таежной зоне на склоне горы и обнажает плейстоценовые криогенные образования, предполагаемым возрастом от MIS 6 (или старше) до MIS 1^[1-7], которые подстилаются коренными породами. Глубина Батагайского обнажения согласно измерениям, проведенным в разные годы, составляет от 50 до 92 м, длина и ширина более 1 км.



Рис. 1. Расположение Батагайского кратера (а) и композитных песчано-ледяных жил 18 и 19 в обнажении термоцирка (б)

Выше коренной породы находятся четыре основных криостратиграфических уровня [2,4], содержащих ледяные жилы (рис. 2). Самый нижний комплекс – темный песок мощностью 3-7 м с включениями гальки, с ледяными жилами высотой не менее 2-3 м и шириной до 1 м. [8] Эти ледяные жилы мало исследованы.

Над ним находится *нижний песок* – толща мощностью от 20 до 30 м.

Нижний песок в нижней части разреза это довольно мощная и, по-видимому, довольно древняя горизонтально-слоистая толща представленная горизонтальным переслаиванием более темных и более светлых отложений. Этот горизонт нижнего песка рассекают узкие повторно-жильные льды (рис. 3). Длинные и узкие сингенетические ледяные жилы (ширина $\leq 0,5$ м, располагаются по всей толще нижнего песка на расстоянии 1-3 м друг от друга). Лед ледяных жил четко вертикально слоистый с элементарными вертикальными прожилками, насыщенными грунтовыми частицами, располагающиеся в виде клиньев шириной до 1-2 см, вертикально и крутонаклонно-слоисто. Что касается происхождения нижней горизонтально-слоистой толщи нижнего песка, то, возможно она представляет собой древние таберальные отложения, по внешнему виду их можно к таковым отнести. Горизонтальное переслаивание – это более 12-20 горизонтальных слоев, внизу более часто слоистых, в средней части – выраженный горизонтальный темный слой, здесь слоистость реже, в кровле этой горизонтально-слоистой толщи наблюдается частое переслаивание за счет большего содержания органики. [9]

Согласно Дж.Мёртону с соавторами [2,3] фракция 50-250 мкм (в основном от мелкого песка до очень мелкого песка) составляет 77-82%; фракция 10-50 мкм (ил) – 11-12%.



Рис. 2. Панорама Багагайского термоцирка



Рис. 3. Нижний песок с узкими песчано-ледяными жилами в Батагайском разрезе

Расположенный выше верхний ледовый комплекс имеет мощность 20-40 м и содержит сингенетические ледяные жилы шириной до 1-2 м и высотой не менее нескольких метров, залегающие в супесчано-суглинистых и песчаных отложениях. Радиоуглеродный возраст этого горизонта от 49-50 до 12-13 тыс. кал. лет^[1, 5, 6, 8, 10, 11] указывает на возраст от MIS 3 до позднего MIS 2.

Толщина верхнего песка хорошо датирована посредством AMS¹⁴C датировок, полученных по растворимым и нерастворимым включениям органики, экстрагированной из ледяных жил. Ее возраст от 25 до 40 тыс. кал. лет.^[7] Этот возраст, несомненно, еще будет уточняться, однако примерный его диапазон уже известен.

Возраст толщи нижнего песка существенно более проблематичен. Кроме уже упомянутых датировок 49,3 тыс. лет^[2] по древесным остаткам, располагавшимся близ кровли нижнего песка, укажем еще на датировки, полученные Дж.Мёртоном и Т.Опелем с соавторами^[3, 4] более 100 и даже более 200 тыс. лет, а также упомянем OSL и IRSL датировки К.Ашастиной с соавторами^[1]: 123,8, 129, 127,1, 185,3 и 174,4 тыс. лет, полученных из нижнего песка с глубин от 47 до 50 м. И вместе с тем из подстилающего эту толщу слоя непосредственно из ледяной жилы Дж.Мертоном и Т.Опелем с соавтором^[3] и получены весьма противоречивые данные датирования (рис. 4): 2 OSL датировки 244 и 228 тыс. лет и даже по ³⁶Cl/Cl 624 тыс. лет, а по органике из ледяной жилы в нижнем ледовом комплексе получена AMS¹⁴C дата 19 тыс. лет (см. рис. 4). Правда здесь надо подчеркнуть, и авторы публикации^[3] на это указывают, что этот отбор из жилы был выполнен не из вертикальной стенки (где как мы уже упомянули, отбор часто очень опасен и сопряжен с риском), а из фрагмента небольшого обнажения на дне оврага, поэтому авторы^[3] считают эту датировку не кондиционной и мы с ними согласны.

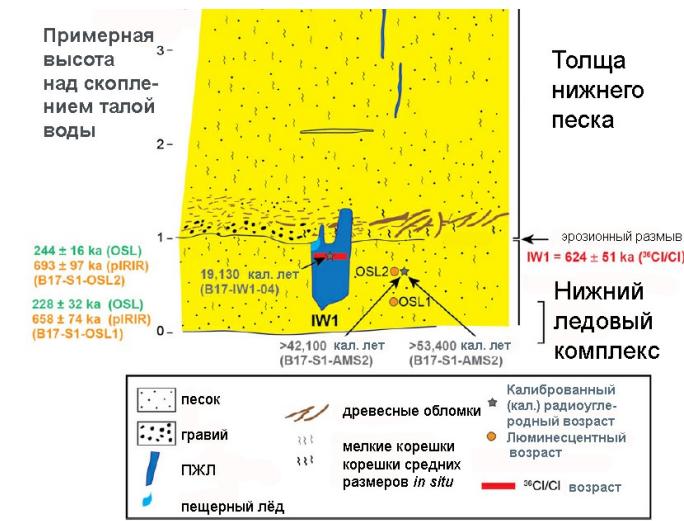


Рис. 4. Криостратиграфическая схема нижней части разреза с возрастными определениями. По Дж.Мёртон и Т.Опель и др.^[3]. Радиоуглеродный возраст показан как калиброванный медианный возраст. Возраст, полученный по инфракрасно-стимулированной люминесценции (pIRIR) и оптически стимулированной люминесценции (OSL), показан оранжевыми кружками, обозначенными «OSL1» и «OSL2».

Приведенные противоречивые данные разнообразного датирования и заметное морфологическое и криолитологическое сходство песчаных толщ с песчано-ледяными жилами, обозначаемых как верхние пески и нижние пески, побудило нас рассмотреть сходства и различия изотопно-геохимического состава песчано-ледяных жил обеих песчаных свит, что может послужить как доказательством близости их возраста и генезиса, или подтвердить существенные различия их возраста как это принято в большинстве публикаций.

Цель данной работы — охарактеризовать изотопно-геохимические особенности композитных песчано-ледяных жил (ПЛЖ) в толще нижнего песка, сравнить их с аналогичными жилами в толще верхнего горизонта песка и критически рассмотреть возрастные привязки времени формирования ПЛЖ толщи нижнего песка.

Методы исследований

Полевые работы. Отбор образцов льда из композитных ПЛЖ, вскрываемых в нижнем песке Батагайского разреза, производился 14 августа 2019 гг. Образцы льда отбирались по вертикали через каждые 10-20 см (рис. 5, 6) с помощью дрелей Makita DDF481rte 18В и Bosch GSR 36 VE-2-LIc стальными коронками для льда диаметром 51 мм. Для зачистки места отбора приповерхностный слой мощностью 2-3 см с поверхности ПЛЖ снимался с помощью бура и далее отбирались более глубинные образцы из той же лунки. Образец, состоящий из песка и льда диаметром 5 см (рис. 7), высверливался из ПЛЖ и упаковывался в полиэтиленовые пакеты. Вес каждого образца составляла около 200 г. Координаты ПЛЖ регистрировались с помощью GPS. Лёд растапливался в пакетах при температуре +20°C. С помощью pH- и ЕС-метров измерялись кислотность и электропроводность талой воды. Затем талая вода переливалась в пластиковые флаконы ёмкостью 10 мл с плотно закрывающейся крышкой.



Рис. 5. Отбор серии образцов (а) из узкой ПЛЖ №18 (б) нижнего песка Батагайского разреза



Рис. 6. Отбор (а) и расположение серии образцов (б) из ПЛЖ № 19 нижнего песка Батагайского разреза



Рис. 7. Образцы льда из ПЛЖ №18 нижнего песка Батагайского разреза: а – В-ВВ/2019-144; б – В-ВВ/2019-145

Композитная песчано-ледяная жила 18 (координаты 67,58195° с.ш., 134,76247° в.д.), композитная песчано-ледяная жила 19 (координаты 67,58182° с.ш., 134,76253° в.д.. отбирались практически одновременно снизу-вверх в нижней доступной части (рис. 8).

Измерения макрокомпонентного состава льда ПЛЖ были проведены в 52 образцах с помощью ионного хроматографа «Стайер» (Россия), предназначенном 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). Предел детектирования по хлорид-иону 0,02 мг/л.

Измерения изотопного состава кислорода и дейтерия ($\delta^{18}O$ и δ^2H) во льду ПЛЖ были выполнены авторами в лаборатории стабильных изотопов географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на масс-спектрометре Delta-V Plus с использованием комплекса газ-бенч. Для калибровки измерений использовались международные стандарты V-SMOW, GRESP, SLAP. Погрешность определений составила $\pm 1\text{‰}$ для δ^2H и $\pm 0.4\text{‰}$ для $\delta^{18}O$. Значения $\delta^{18}O$ и δ^2H выражены в промилле относительно VSMOW. Дейтериевый эксцесс d_{exc} рассчитан по формуле В. Дансгора [12]: $d_{exc} = \delta^2H - 8\delta^{18}O$.

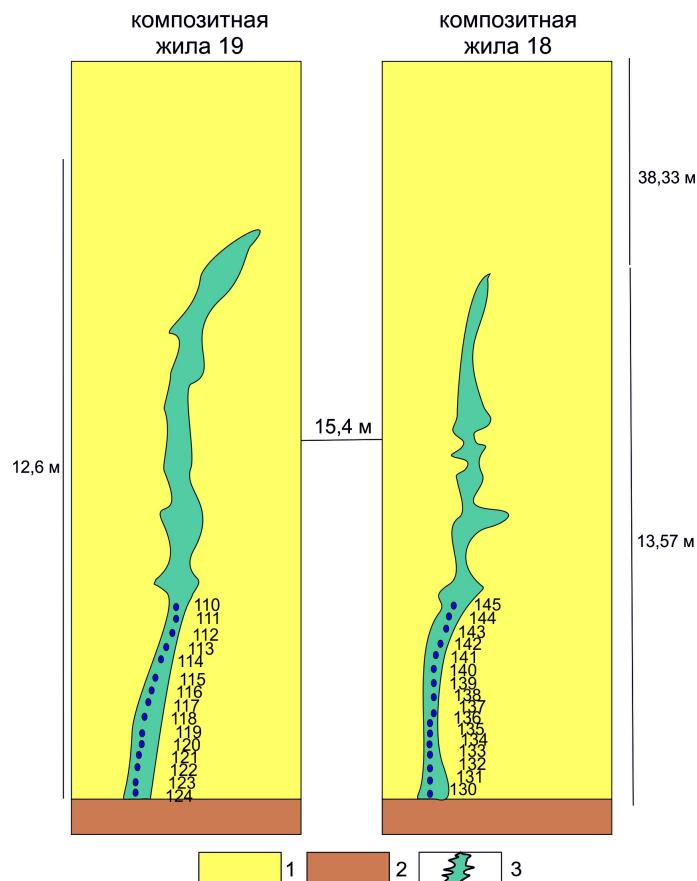


Рис. 8. Взаимное расположение и параметры композитных ПЛЖ №№ 18 и 19 в толще нижнего песка. Полевая зарисовка: 1 – толща нижнего песка; 2 – подстилающая толща; 3 – композитные ПЛЖ.

Лабораторные методы и статистика

Статистическая обработка изотопных данных

Для оценки значимости статистических различий в изотопном составе песчано-ледяных жил в верхних и нижних песках Батагайского разреза проводилась проверка нормальности распределения с помощью теста Шапиро-Уилка [13]. Нормально распределённые величины сравнивались по t -критерию Уэлча, распределения, отличающиеся от нормальных, сравнивались с помощью U-критерия Манна-Уитни [14].

Тест t-критерия Уэлча [15] был применен для проверки статистической гипотезы о равенстве математических ожиданий случайных величин, когда две выборки имеют неодинаковую дисперсию и, возможно, неодинаковые размеры выборки. Для оценки значимости результатов было выбрано р-значение 0,01. Размер выборки значений $\delta^{18}\text{O}$ составил 50 для ПЛЖ из верхнего песка, 29 – для ПЛЖ из нижнего песка; значений $\delta^2\text{H}$ – 49 для ПЛЖ из верхнего песка, 30 – для ПЛЖ из нижнего песка; значений d_{exc} – 41 для ПЛЖ из верхнего песка, 29 – для ПЛЖ из нижнего песка. Расчеты и визуализация проведены в интерактивной среде разработки на языке Python — Jupyter Notebook с использованием библиотек Pandas, NumPy, Matplotlib.

Результаты

Криостратиграфия

Песчано-ледяные жилы нижнего песка Батагайского термоцирка залегают преимущественно на глубинах 38-52 м, они имеют ширину преимущественно 0,15-0,2 м и высоту обычно 10-12 м. Зафиксировано частое чередование ледяных и грунтовых жилок. Песчано-ледяные жилы нижнего песка сложены жилками льда мутными желто-коричневыми, шириной от 0,2 до 0,5-1 см с вертикальными и субвертикальными жилками грунта темно-коричневыми, шириной от 0,1 до 0,7 см. Грунтовые жилки составляют от 50 до 70% объема ПЛЖ.

Изотопный состав ПЛЖ

Анализ изотопного состава кислорода и водорода выполнен в 29 образцах ПЛЖ №№ 18 и 19 нижнего песка Батагайского термоцирка (табл. 1).

Таблица 1. Значения $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d_{exc} в ПЛЖ нижнего песка Батагайского термоцирка

Полевой номер образца	Глубина, м	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	d_{exc} , ‰
ПЛЖ № 18				
B-VV/2019-130	49,5	-34,95	-257,1	22,5
B-VV/2019-131	49,35	-36,09	-255,3	31,62
B-VV/2019-132	49,15	-35,97	-254,6	33,16
B-VV/2019-133	49,0	-35,23	-246,7	35,14
B-VV/2019-	48,8	-35,08		32,24

134			-248,4	
B-VV/2019-135	48,65	-34,76	-242,5	35,58
B-VV/2019-136	48,5	-33,89	-237,7	33,42
B-VV/2019-138	48,15	-34,40	-232,8	42,4
B-VV/2019-139	47,95	-34,07	-232,8	39,76
B-VV/2019-140	47,8	-33,31	-228,3	38,18
B-VV/2019-141	47,65	-33,28	-231,1	35,14
B-VV/2019-142	47,45	-33,53	-228,3	39,94
B-VV/2019-143	47,2	-33,52	-235,9	32,26
B-VV/2019-144	47,05	-33,35	-233,3	33,5
B-VV/2019-145	46,9	-33,14	-237,9	27,22
<i>ПЛЖ №19</i>				
B-VV/2019-110	48,93	-32,32	-231,2	27,36
B-VV/2019-111	49,08	-32,84	-230,1	32,62
B-VV/2019-112	49,23	-32,94	-233,7	29,98
B-VV/2019-113	49,43	-33,35	-235,3	31,5
B-VV/2019-114	49,58	-33,22	-230,1	35,66
B-VV/2019-115	49,73	-33,36	-236,7	30,18

B-VV/2019-116	49,93	-32,77	-233,9	28,26
B-VV/2019-117	50,08	-33,5	-233,9	34,1
B-VV/2019-118	50,18	-33,82	-232,9	37,66
B-VV/2019-119	50,38	-33,93	-239,0	32,44
B-VV/2019-120	50,53	-33,17	-239,1	26,26
B-VV/2019-121	50,68	-34,30	-235,9	38,5
B-VV/2019-122	50,83	-33,7	-235,3	34,3
B-VV/2019-123	50,98	-33,45	-236,1	31,5
B-VV/2019-124	51,13	-34,30	-232,8	41,6

Для льда ПЛЖ получены в целом довольно низкие значения изотопного состава. Значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют от $-36,09$ до $-32,32\text{\textperthousand}$ (средние значения $-34,3$ и $-33,4\text{\textperthousand}$), значения $\delta^2\text{H}$ – от $-257,1$ до $-230,1\text{\textperthousand}$ (средние значения $-240,2$ и $-234,4\text{\textperthousand}$), при этом для всех образцов льда получены очень высокие значения d_{exc} – от $22,5$ до $42,4\text{\textperthousand}$ (средние значения $34,1$ и $32,8\text{\textperthousand}$) (табл. 1, 2).

В распределении значений изотопного состава (для величин $\delta^{18}\text{O}$) отмечено заметное снижение значений с глубиной на $2,5\text{-}3\text{\textperthousand}$ (рис. 9).

Таблица 2. Значение $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d_{exc} (минимальные, средние и максимальные) в песчано-ледяных жилах нижнего песка Батагайского термоцирка

№ ПЛЖ	Кол-во образцов	$\delta^{18}\text{O}$, \textperthousand			$\delta^2\text{H}$, \textperthousand			d_{exc} , \textperthousand		
		Мин.	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.
18	15	– 36,09	-34,3	– 33,14	– 257,1	- 240,2	– 228,3	22,5	34,1	42,4
19	14	-33,3	-33,4	– 32,32	– 239,1	– 234,4	– 230,1	27,36	32,8	41,6

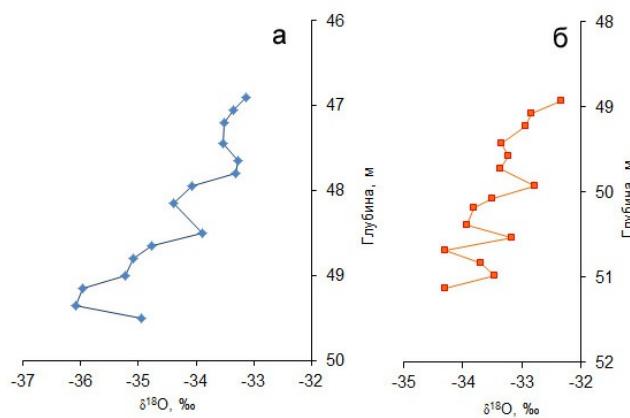


Рис. 9. Распределение значений $\delta^{18}\text{O}$ во льду песчано-ледяных жил нижнего песка Батагайского разреза (а – жила № 18, б – жила № 19).

Соотношение $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ для льда жилы № 18 описывается уравнением $\delta^2\text{H} = 8,71\delta^{18}\text{O} + 59$, $R^2 = 0,76$ (рис. 10), для льда жилы № 19 корреляция между данными почти отсутствует ($R^2=0,1$), в связи с очень небольшим диапазоном значений $\delta^2\text{H}$. Наклон линии соотношения $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ для льда жилы № 18 близок к наклону для ГЛМВ, но из-за высокого значения свободного члена (высоких значений d_{exc}) в уравнении линия расположена заметно выше ГЛМВ.

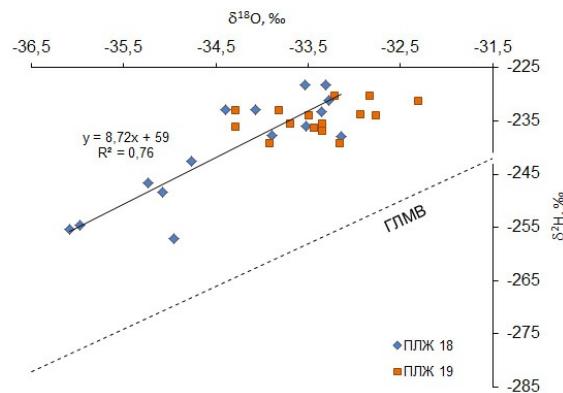


Рис. 10. Соотношение $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ во льду песчано-ледяных жил (№№ 18 и 19) нижнего песка Батагайского разреза. ГЛМВ – глобальная линия метеорных вод.

Результаты статистических тестов изотопного состава песчано-ледяных жил

По результатам теста Шапиро-Уилка распределение значений $\delta^{18}\text{O}$ в ПЛЖ в верхних и нижних песках отличается от нормального (в нижних песках $p = 0,0287$, в верхних песках - $p = 0,022$). По результатам теста Шапиро-Уилка распределение $\delta^2\text{H}$ в ПЛЖ в верхних и нижних песках отличается от нормального (в нижних песках $p = 0,0003$, в верхних песках - $p = 0,0254$). По результатам теста Шапиро-Уилка распределение d_{exc} в песчано-ледяных жилах в верхних и нижних песках похоже на нормальное (в нижних песках $p = 0,0563$, в верхних песках - $p = 0,1892$). Поскольку распределение в основном

отличается от нормального, применен тест Манна-Уитни. Для параметра d_{exc} , распределенного нормально, применен t-критерий Уэлча. По результатам теста Манна-Уитни медиана и среднее $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в песчано-ледяных жилах в верхних и нижних песках статистически значимо различаются ($U = 328$, $p = 0,00006$ и $U = 369,5$, $p = 0,00023$, соответственно). Для $\delta^{18}\text{O}$ среднее в ПЛЖ в верхних песках: $-34,852\text{\textperthousand}$, в ПЛЖ в нижних песках: $-33,95\text{\textperthousand}$, медиана в ПЛЖ в верхних песках: $-34,685\text{\textperthousand}$, в ПЛЖ в нижних песках: $-33,53\text{\textperthousand}$ (рис. 11).

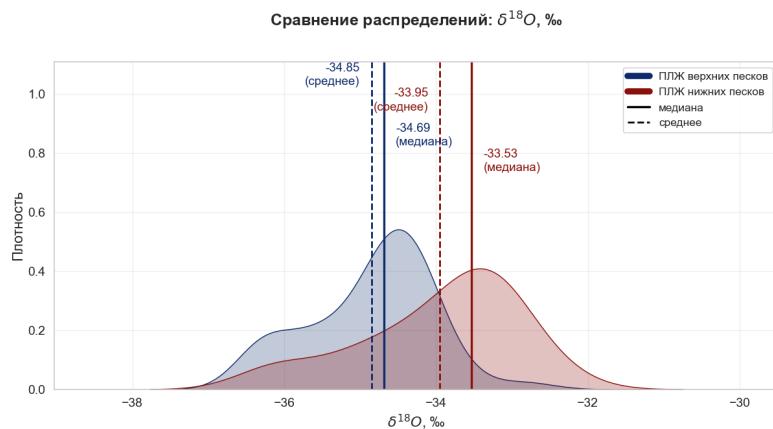


Рис. 11. Сравнение распределений значений $\delta^{18}\text{O}$ в ПЛЖ из верхнего и нижнего горизонтов песка Батагайского термоцирка

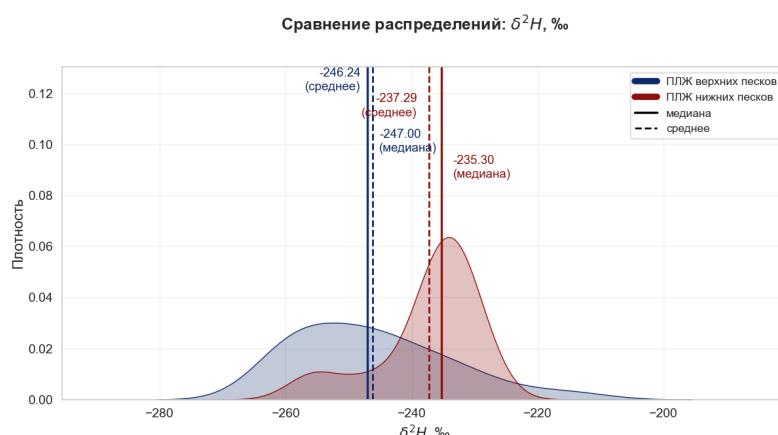


Рис. 12. Сравнение распределений значений $\delta^2\text{H}$ в ПЛЖ из верхнего и нижнего горизонтов песка Батагайского термоцирка

Среднее значение $\delta^2\text{H}$ в ПЛЖ в верхних песках равно $-246,241\text{\textperthousand}$, в ПЛЖ в нижних песках: $-237,29\text{\textperthousand}$, медиана значений $\delta^2\text{H}$ в ПЛЖ в верхних песках равна $-247,0\text{\textperthousand}$, в ПЛЖ в нижних песках: $-235,3\text{\textperthousand}$ (рис. 12). Поскольку распределение значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в ПЛЖ из нижнего и верхнего песчаных горизонтов в основном отличается от нормального, был применен тест Манна-Уитни; т.к. для значений d_{exc} получено нормальное распределение, был применен t-критерий Уэлча. По результатам теста t-критерия Уэлча медиана и среднее d_{exc} статистически не отличаются ($t = -0,747$, $p = 0,4576$). Среднее значение d_{exc} в ПЛЖ в верхних песках: 32,662, в ПЛЖ в нижних песках: 34,134, медиана в ПЛЖ в верхних песках: 32,08, в ПЛЖ в нижних песках: 33,16 (рис. 13).

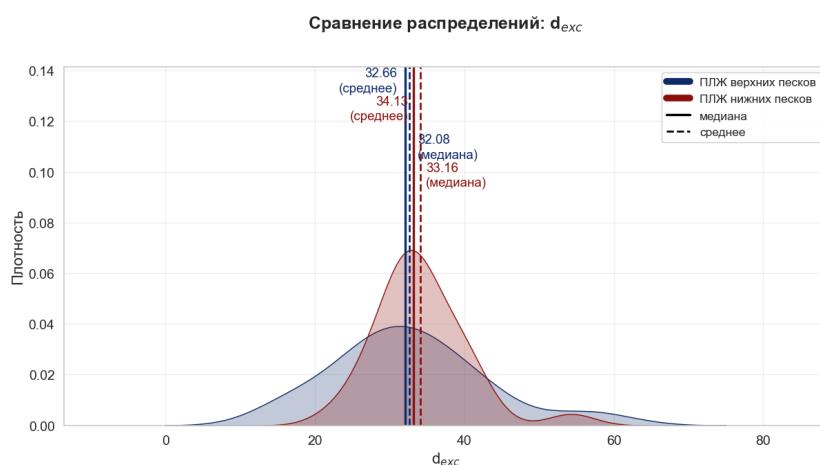


Рис. 13. Сравнение распределений значений d_{exc} в ПЛЖ из верхнего и нижнего горизонтов песка Батагайского термоцирка

Таким образом, в результате проведения статистических тестов изотопного состава песчано-ледяных жил выявлено, что распределения значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в песчано-ледяных жилах в верхних и нижних песках статистически значимо различаются, а распределения значений d_{exc} в песчано-ледяных жилах в верхних и нижних песках не имеют статистически значимых различий, что связано с близкими значениями медианы и среднего значения d_{exc} (среднее значение d_{exc} в песчано-ледяных жилах в верхних песках: 32,08, в нижних песках: 33,16) и среднего значения d_{exc} (среднее значение d_{exc} в песчано-ледяных жилах в верхних песках: 32,662, в нижних песках: 34,134), значение t -критерия Уэлча равное -0,747 говорит об отсутствии статистического различия значений d_{exc} в песчано-ледяных жилах в верхних и нижних песках.

Ионный состав композитных песчано-ледяных жил

Изучен ионный состав в 22 образцах из песчано-ледяных жил 18 и 19 (табл. 2). Согласно гидрохимической классификации подземных льдов [16] ПЛЖ в нижнем песке в основном опресненные, среднее значение концентрации (TDS) 332 мг/л, в верхней части ПЛЖ 18 на отметках 46,9-47,8м концентрация повышается до 414-823 мг/л т.е. лед слабосоленый, pH находится в интервале 7,1-8,3.

В ионном составе ПЛЖ 18 и 19 из нижнего песка отмечено преобладание анионов сульфатов (SO_4^{2-}), содержание которых достигает 868 мг/л, среди катионов преобладает кальций (Ca^{2+}) — до 194 мг/л. Концентрация хлоридов (Cl^-) достигает 118 мг/л, максимальное значение соотношения анионов Cl^- к SO_4^{2-} — 2,49, среднее значение — 0,59, минимальное — 0,1. Максимальное значение $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ отмечено в образце с максимальной концентрацией ионов в ПЛЖ 18 на глубине 47,65-823 мг/л, здесь же отмечен максимум концентрации Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , а также Cl^- , SO_4^{2-} . Минимальные значения концентрации Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , отмечены на глубине 49 м. Значение $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ у большинства образцов ниже единицы очевидно, что относительно высокое

значение этого показателя не связано с влиянием положения береговой линии (находящейся довольно далеко), а скорее всего с интенсивностью испарения на склоне в период заполнения трещин. Минимальные значения концентрации Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , в ПЛЖ 19 отмечаются на глубине 50,18 м, а максимальные концентрации Mg^{2+} и NO_3^- , SO_4^{2-} , 50,98 м. Согласно результатам определений изотопного отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в пыли из ледяных жил едомы Батагая^[17] установлено, что основной источник пыли в центральной Якутии в позднем плейстоцене – это пустыни Восточной Азии (Такла-Макан, Гоби и др.).

Таблица 3. Ионный состав узких песчано-ледяных жил 18 и 19 из Нижнего песка

Полевой номер образца	Гл., м	ЕС, мсм	Na^+ , мг/л	K^+ , мг/л	Mg^{2+} , мг/л	Ca^{2+} , мг/л	F, мг/л	Cl^- , мг/л	NO_3^- , мг/л	SO_4^{2-} , г/л	Cl
ПЛЖ 18											
B-VV/2019-132	49,15	245	7,23	3,00	2,06	34,13	0,14	12,20	15,27	25,44	(
B-VV/2019-133	49,0	203	5,28	4,14	7,55	29,01	0,11	11,01	0,10	16,12	(
B-VV/2019-134	48,8	393	18,63	5,69	14,65	46,34	0,11	22,49	1,62	56,27	(
B-VV/2019-135	48,65	57	30,00	5,54	19,62	59,06	0,10	36,47	67,15	76,73	(
B-VV/2019-136	48,5	1032	58,66	6,72	41,90	91,42	0,18	69,74	104,86	185,27	(
B-VV/2019-138	48,15	728	36,52	3,07	42,75	74,75	0,28	46,30	52,46	102,81	(
B-VV/2019-139	47,95	595	88,13	6,38	137,01	171,07	0,37	96,21	93,29	716,60	(
B-VV/2019-140	47,8	920	107,13	14,51	156,62	182,20	0,14	115,00	111,70	645,61	(
B-VV/2019-141	47,65	1828	150,37	25,13	255,00	194,00	0,19	118,45	96,90	868,00	(
B-VV/2019-144	47,05	1135	75,40	4,36	75,57	100,00	0,86	80,75	54,76	153,26	(
B-VV/2019-145	46,9	976	72,13	7,04	55,60	86,40	0,52	69,87	0,10	156,13	(

ПЛЖ 19

B-VV/2019-110	48,93	397	22,38	4,23	15,84	39,63	0,20	32,94	38,53	36,54	
B-VV/2019-111	49,08	462	25,21	4,26	20,89	40,31	0,15	38,50	36,45	44,88	
B-VV/2019-114	49,58	575	20,26	3,72	34,61	83,75	0,45	26,99	47,47	112,82	
B-VV/2019-115	49,73	913	41,67	5,73	61,32	112,97	0,25	53,54	66,48	161,52	
B-VV/2019-116	49,93	-	71,60	7,36	74,20	101,83	0,19	81,65	7,76	230,28	
B-VV/2019-117	50,08	803	44,61	5,44	40,56	66,25	0,30	50,55	1,51	124,00	
B-VV/2019-118	50,18	696	2,10	3,77	3,70	12,24	0,10	6,19	0,10	3,37	
B-VV/2019-119	50,38	610	25,13	3,77	24,50	77,74	0,25	20,24	1,00	111,87	
B-VV/2019-120	50,53	990	36,54	4,42	43,94	119,00	0,29	28,93	42,72	294,15	
B-VV/2019-122	50,83	900	49,66	4,55	56,66	61,55	0,24	32,86	62,01	165,92	
B-VV/2019-123	50,98	1405	54,01	5,01	102,67	12,85	0,34	29,81	91,91	409,95	
B-VV/2019-124	51,13	375	15,18	7,37	20,97	68,88	0,50	7,20	28,96	39,62	

Дискуссия

В распределении значений $\delta^{18}\text{O}$ по глубине ПЛЖ из нижнего песка близки к двум жилам (№№ 10 и 11) из верхнего песка, в которых также отмечено явное снижение значений сверху-вниз на 1,5-2‰ (рис. 14 а, б), в то время как в двух других жилах из верхнего песка, из которых производился отбор вдоль вертикальных осей, были выявлены другие изотопные тренды – повышение значений с глубиной в жиле №12 (рис. 14, в) и заметные вариации значений в жиле №14 (рис. 14, г).

По параметрам наклона линии соотношения $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ жилы нижнего песка близки к жилам из верхнего песчаного горизонта, для которых эта линия имеет близкий к ГЛМВ наклон (8,6), но при этом расположена выше ГЛМВ (рис. 15).

Полученные нами изотопные данные по ПЛЖ из Верхнего песка близки к данным, полученным Я. Тихонравовой с соавторами [18], проводивших исследование структуры и изотопно-геохимического состава композитных и ледяных жил Батагайского разреза [18]: среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ составило $-32,1\text{\textperthousand}$, среднее значение $d_{\text{exs}} = 28,1\text{\textperthousand}$. Ранее Т.Опелем с соавторами [8] были получены близкие значения $\delta^{18}\text{O}$ для двух композитных жил из верхнего песка: -33.04 и $-32,14\text{\textperthousand}$, при этом средние значения d_{exs} в этих жилах оказались намного выше и составили $15,1$ и $14,7\text{\textperthousand}$.

По данным Я.Тихонравовой с соавторами [18] для льда композитной жилы из Верхнего песка значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ расположены выше ГЛМВ и всех значений по ледяным жилам, наклон линии соотношения $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ для композитной жилы составляет 9,43. Т.Опелем с соавторами [8] было отмечено, что чем больше содержание осадка во льду, тем выше над ГЛМВ расположены значения изотопного состава жил и тем выше соответствующие значения d_{exs} .

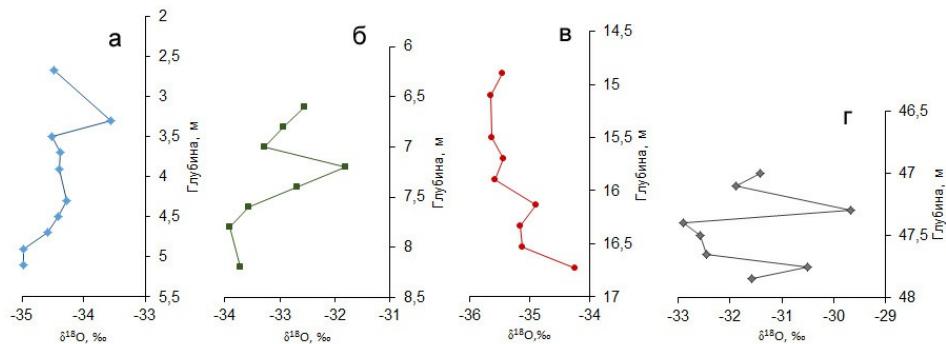


Рис. 14. Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ в песчано-ледяных жилах верхнего песка Батагайского разреза (а – жила №10, б – жила №11, в – жила №12, г – жила №14) (по данным из [7]).

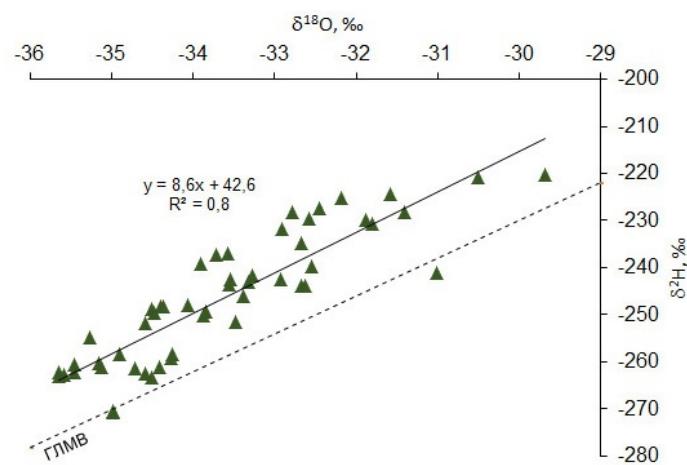


Рис. 15. Соотношение $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ во льду песчано-ледяных жил (№№ 10-15) верхнего

песка Батагайского разреза. ГЛМВ – глобальная линия метеорных вод.

Сопоставление изотопного состава песчано-ледяных жил Батагайского разреза с подобными жилами в других районах их распространения показали ряд общих особенностей. Композитные песчано-ледяные жилы были исследованы Дж.Мёртоном с соавторами [19] в обнажении формации Улахан Сулар в долине р.Адыча, примерно в 50 км к востоку от Батагайского мегаоврага. По жилам получены очень близкие значения $\delta^{18}\text{O}$, составляющие около $-32\text{\textperthousand}$, при этом значения $\delta^2\text{H}$ и соответственно значения d_{exs} значительно варьируют (вариации $\delta^2\text{H}$ от -235 до $-258\text{\textperthousand}$, вариации d_{exs} от -2 до $18\text{\textperthousand}$), что указывает на существенные процессы изотопного фракционирования. По мнению авторов, формирование таких композитных песчано-ледяных жил происходило в сухих условиях, когда снега было недостаточно для заполнения морозобойных трещин, и/или в условиях быстрой аккумуляции песка. В пределах района Батагай-Бетенкес отмечается стратиграфическая корреляция нижних горизонтов песка Батагайского разреза и обнажения Улахан Сулар, их возраст оценивается по OSL датировкам между 210 и >93 тыс. лет назад. Также этот горизонт стратиграфически близок к куччугуйской свите Ойгосского Яра на побережье пролива Дм.Лаптева, в пределах которой встречены как ледяные, так и композитные песчано-ледяные жилы. IRSL датировка 112.5 ± 9.6 тыс. лет в верхней части горизонта позволяет отнести его формирование к началу стадии МИС-5. [19,20]

Ранее, в рамках совместной российско-германской экспедицией проводились исследования песчано-ледяных жил в дельте Лены, на Новосибирских о-вах и на севере Анабаро-Оленекского междуречья (мыс Мамонтов Клык: $73^{\circ}35'$ с.ш., $117^{\circ}10'$ в.д.). В обнажении Мамонтов Клык мощные композитные жилы были встречены [21] в песках, подстилающих отложения ледового комплекса. В большинстве изученных разрезов композитные песчано-ледяные жилы образуют с ледяными жилами единые полигонально-жильные системы, характеризующиеся взаимными переходами. В некоторых случаях композитные жилы контактируют с внедряющимися в них сверху мощными ледяными жилами ледового комплекса. Возраст отложений, вмещающих жилы, оценивается около 50 тыс. лет и более.

Средние значения $\delta^{18}\text{O}$ верхнеплейстоценовых (докаргинских) песчано-ледяных жил, показывают его сходство на островах Бол. Ляховский, Котельный и Столбовой и мысе Мамонтов Клык – вариации средних значений $\delta^{18}\text{O}$ составляют от $-28,5$ до $-31,7\text{\textperthousand}$, в то время как для ледяных жил в этих же отложениях значения $\delta^{18}\text{O}$, как правило, ниже и достигают $-29,2\ldots-32\text{\textperthousand}$. В координатах $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ значения для большинства исследованных композитных жил расположены вблизи глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ), средние значения d_{exs} варьируют от 3.2 до $18,5\text{\textperthousand}$, но в большинстве жил средние значения d_{exs} не превышают $10\text{\textperthousand}$ и вариации значений в пределах одной жилы незначительные. Скорее всего, при формировании композитных жил в прибрежных районах севера Якутии изотопное фракционирование было менее интенсивным, чем при формировании композитных жил в более континентальных районах. [22]

Особенности формирования композитных песчано-ледяных жил Батагайского разреза

Скорее всего, формирование песчано-ледяных жил происходило в условиях очень

холодных и сухих зим, когда морозобойные трещины заполнялись переувлажненным грунтом и реже талой снеговой водой.

Петрографический анализ льда из композитных и ледяных жил Батагайского разреза, выполненный Я. Тихонравовой с соавторами [18], показал, что средние размеры кристаллов ледяных жил больше, чем у композитных жил. В детально исследованной композитной жиле верхнего песчаного горизонта размер мелких кристаллов льда по длинной оси варьирует от 0.16 до 0.8 мм, кристаллы такого размера не были встречены в ледяных жилах. Эти мелкие кристаллы образуют вертикальные микролинзовидные криотекстуры внутри песчаных жил, которые можно идентифицировать как сегрегационный лед, образовавшийся из поровой влаги, мигрирующей к фронту замерзания. Сегрегационный лед мог формировать композитные жилы в том случае, если морозобойные трещины были заполнены переувлажненным талым грунтом, а не талой водой или сухим песком. Поровая вода из талых отложений мигрировала к двум холодным стенкам трещины (фронтам замерзания), образуя кристаллы сегрегационного льда, расположенные перпендикулярно фронту замерзания. По мере поступления в трещину талого переувлажненного грунта формируются новые слои сегрегационного льда ближе к центру трещины, в конечном итоге образуя вертикально ориентированные микролинзовидные криотекстуры внутри композитных жил. [18]

Высокие значения d_{exc} во льду композитных жил могут являться признаком существенного изотопного фракционирования во время формирования этих жил в результате сублимации тонкого снежного покрова, диффузии водяного пара в снеге и других факторов. Также возможно, что зимние осадки могли характеризоваться высокими значениями d_{exc} . В настоящее время высокие значения d_{exc} (до 20-30‰ и выше) отмечаются в континентальных районах Сибирской криолитозоны (Забайкалье) и во внутренних районах Цинхай-Тибетского нагорья на севере Китая [23, 24, 25], как результат дальнего переноса воздушных масс от источника испарения.

Дополнительным фактором, определяющим изотопное фракционирование и как результат, формирование высоких значений d_{exc} , может быть взаимодействия воды с песчаными частицами. Исследования формирования изотопного состава флюидов геотермальных систем Исландии показали, что заметное изменение изотопного состава водорода флюидов обусловлен, скорее всего, диффузионным обменом с реликтовыми минералами, такими, как например, эпидот, которые сохраняют изотопный сигнал флюидов ледникового происхождения, существовавших на ранней стадии развития геотермальной системы [26]. Также известно, что при взаимодействии каолиновых глин с водой при разных температурах происходит фракционирование. Линии соотношения $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ для глин располагаются параллельно линии метеорных вод, но смещены относительно нее в зависимости от коэффициента изотопного фракционирования. [27]

Ионный состав ПЛЖ в слое Нижнего песка существенно отличается от ионного состава ледяных жил Батагайской едомы (Верхнего ледового комплекса), [28, 29] но в достаточной мере близок к составу ПЛЖ верхнего песка. [30] В ионном составе композитных песчано-ледяных жил Верхнего и Нижнего песчаных слоев преобладают анионы сульфатов до 372 мг/л их содержание на один и даже на два порядка больше, чем во льду большинства едомных жил; среди катионов в составе композитных жил выделяются

кальций (до 172 мг/л).^[30] Значения ЕС в среднем составляют в песчано-ледяных жилах: №10 – 407 мсм, №11 – 742 мсм, №12 – 583 мсм, №14 – 783 мсм, №15 – 696 мсм; б). Средние значения содержания катионов Na^+ в песчано-ледяных жилах: №10 – 22 мг/л, №11 – 63 мг/л, №12 – 28 мг/л №14 – 57 мг/л, №15 – 35 мг/л; в). Средние значения содержания катионов K^+ в песчано-ледяных жилах: №10 – 4 мг/л, №11 – 4 мг/л, №12 – 2 мг/л №14 – 4 мг/л, №15 – 4 мг/л; г). Средние значения содержания катионов Mg^{2+} в песчано-ледяных жилах: №10 – 12 мг/л, №11 – 45 мг/л, №12 – 16 мг/л, №14 – 58 мг/л, №15 – 36 мг/л; д). Средние значения содержания катионов Ca^{2+} в песчано-ледяных жилах: №10 – 0,42 мг/л, №11 – 89 мг/л, №12 – 63 мг/л №14 – 92 мг/л, №15 – 98 мг/л; е). Средние значения содержания фторидов F^- в песчано-ледяных жилах: №10 – 0,26 мг/л, №11 – 0,71 мг/л, №12 – 0,26 мг/л №14 – 0,54 мг/л, №15 – 0,28 мг/л; ж. Средние значения содержания анионов хлоридов Cl^- в песчано-ледяных жилах: №10 – 23 мг/л, №11 – 48 мг/л, №12 – 41 мг/л №14 – 51 мг/л, №15 – 35 мг/л; з. Средние значения содержания анионов NO_3^- в песчано-ледяных жилах: №10 – 4 мг/л, №11 – 24 мг/л, №12 – 7 мг/л №14 – 38 мг/л, №15 – 51 мг/л; и. Средние значения содержания анионов SO_4^{2-} в песчано-ледяных жилах: №10 – 27 мг/л, №11 – 104 мг/л, №12 – 105 мг/л, №14 – 128 мг/л, №15 – 64 мг/л; к. Средние значения соотношения $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ в песчано-ледяных жилах: №10 – 1,45, №11 – 0,64, №12 – 0,45, №14 – 0,44, №15 – 0,55 (табл. 4, 5]. Как следует из полученных данных ПЛЖ в Нижнем песке более минерализованы в основном за счет анионов SO_4^{2-} : максимальная концентрация которых в Нижнем песке 868 мг/л при значении средней концентрации 737 мг/л, а в Верхнем песке максимум концентрации сульфат-иона 372 мг/л, среднее значение 114 мг/л.

Таблица 4. Ионный состав узких песчано-ледяных жил 18 и 19 из Нижнего песка (минимальные, средние и максимальные значения)

Ионный состав	ПЛЖ-18 (n=15)			ПЛЖ-19(n=14)		
	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.
ЕС, мсм	57	737,5	1828	375	738,2	1405
TDS, мг/л	25,65	331,875	822,6	168,75	332,19	632,25
Na^+ , мг/л	5,28	59,0	150,37	2,10	34,0	71,60
K^+ , мг/л	3,07	7,8	25,13	3,72	4,97	7,37
Mg^{2+} , мг/л	2,06	73,5	255,0	3,70	41,66	102,67
Ca^{2+} , мг/л	29,01	97,1	194,0	12,24	66,42	119,0
F , мг/л	0,1	0,3	0,86	0,1	0,3	0,50
Cl^- , мг/л	11,01	61,7	118,45	6,19	34,12	81,65
NO_3^- , мг/л	0,1	54,4	111,7	0,1	35,41	91,91
SO_4^{2-} , г/л	16,12	272,9	868,0	3,37	144,58	409,95
$\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$	0,18	0,93	1,97	0,1	0,96	2,49

Химический состав ПЛЖ 18 и ПЛЖ 19 в Нижнем песке имеет больше сходства, чем различий: близки средние значения минерализации 332мг/л, среди катионов

преобладают Ca^{2+} , в среднем составляя 66-97 мг/л, а среди анионов SO_4^{2-} , среднее значение - 144-273 мг/л. Наибольший разброс среди катионов отмечен для Mg^{2+} (2-255 мг/л), а среди анионов для NO_3^- (0,1-111,7 мг/л) (табл. 4, 5).

Сравнение химического состава ПЛЖ из Верхнего и Нижнего песка (табл. 5) демонстрирует близкие средние значения минерализации (291-332 мг/л), во льду ПЛЖ из Нижнего песка максимальная концентрация получена для катиона Mg^{2+} (255мг/л), а во льду ПЛЖ из Верхнего песка для катиона Ca^{2+} (172 мг/л), но средние значения для Ca^{2+} самые высокие как ПЛЖ из Нижнего песка (81,1 мг/л), так и из Верхнего (77,5 мг/л), минимальные значения также высокие 12,2-22,4 мг/л; среди анионов наиболее высокая концентрация наблюдается для SO_4^{2-} как для максимальных(372-868 мг/л), так и для средних значений (99,5-206 мг/л), среди минимальных значений самые высокие значения у аниона Cl^- (4,5-6,2 мг/л). В химическом составе ПЛЖ из Верхнего песка также отмечается самый значительный разброс значений для аниона NO_3^- (0,1-140 мг/л).

Гораздо более значительные различия прослеживаются при сравнении химического состава ПЛЖ из песков и ПЖЛ из едомы верхнего и нижнего ярусов ледяных жил. Ожидаемо, что средние и максимальные значения минерализации у ПЛЖ заметно выше, чем у ПЖЛ (табл. 5, 6), но минимальные значения минерализации ПЖЛ 3,5,7 (32 мг/л) несколько выше минерализации ПЛЖ из Нижнего песка (25,7 мг/л).

Среди катионов в химическом составе ПЖЛ преобладают катионы Ca^{2+} , в среднем составляя 28,9-34,4 мг/л, т.е. отмечается сходство с химическим составом ПЛЖ, а среди анионов в составе ПЖЛ 3,5,7 заметно относительно высокое минимальное и максимальное содержание аниона NO_3^- , 5, 54,8 мг/л , среднее значение -15,4 мг/л, в ПЖЛ 17 и 20 в самой верхней части едомы максимальная концентрация аниона NO_3^- не выше 25,3 мг/л. Отметим близкие значения отношения $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ для всех рассматриваемых объектов.

Таблица 5. Ионный состав узких песчано-ледяных жил из Нижнего песка и Верхнего песка (минимальные, средние и максимальные значения). По данным из [\[28, 29\]](#)

Ионный состав	ПЛЖ-18,19, Нижний песок (n=29)			ПЛЖ-10,11,12,14, Верхний песок (n=26)		
	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.
EC, мсм	57	738,1	1828	169,0	647,4	1576,0
TDS, мг/л	25,7	332,5	822,6	76,1	291,3	709,2
Na^+ , мг/л	2,10	46,0	150,4	2,2	45,3	117,2
K^+ , мг/л	3,0	6,3	25,1	1,3	4,1	9,6
Mg^{2+} , мг/л	2,1	56,9	255,0	4,9	34,6	115,0
Ca^{2+} , мг/л	12,2	81,1	194,0	22,4	77,5	172,0

F, мг/л	0,1	0,3	0,9	0,1	0,5	2,0
Cl ⁻ , мг/л	6,2	47,3	118,5	4,5	43,4	94,5
NO ₃ ⁻ , мг/л	0,1	44,5	111,7	0,1	20,9	140,4
SO ₄ ²⁻ , г/л	3,4	206,0	868,0	3,7	99,5	372,0
Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	0,1	0,6	2,5	0,2	0,99	3,7

Таблица 6. Ионный состав узких песчано-ледяных жил из Верхнего ледового комплекса (минимальные, средние и максимальные значения). По данным из [30,31,32,33]

Ионный состав	ПЖЛ-17_20, Верхний ледовый комплекс (едома) (n=100)			ПЖЛ-3_5_7 Верхний ледовый комплекс (едома) (n=71)		
	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.
EC, мсм	37	113	390	71	126,4	296
TDS, мг/л	16,7	50,9	175,5	32,0	56,9	133,4
Na ⁺ , мг/л	0,6	2,3	24,2	0,5	2,2	5,3
K ⁺ , мг/л	0,7	1,6	7,4	0,8	2,2	6,8
Mg ²⁺ , мг/л	1,7	4,3	17,6	2,4	5,6	13,6
Ca ²⁺ , мг/л	8,7	28,9	53,2	12,0	34,4	82,5
F, мг/л	0,1	0,3	1,1	-	-	-
Cl ⁻ , мг/л	0,9	2,2	34,5	1,1	2,2	10,6
NO ₃ ⁻ , мг/л	0,1	5,7	25,3	5,0	13,4	54,8
SO ₄ ²⁻ , г/л	1,1	4,2	30,5	1,4	6,0	40,5
Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	0,2	0,8	3,1	0,05	0,61	2,0

Сопоставление датировок по нижнему и верхнему горизонтам песка, вскрытых в Батагайском термоцирке, показывает, что верхний песок может быть довольно надежно датирован периодом 25-40 тыс. кал. лет, а по нижнему песку интересной может быть датировка 49,32 тыс. лет по древесным остаткам из кровли этого горизонта.

Значения изотопного состава ПЛЖ нижнего песка довольно низкие: δ¹⁸O варьируют от -36,09 до -32,32‰, значения δ²H – от -257,1 до -230,1‰, наиболее низкие значения получены в нижних фрагментах ПЛЖ. Высокие значения d_{exc} во льду – от 22,5 до 42,4‰

– скорее всего, указывают на существенное изотопное фракционирование в тонком снежном покрове в суровых зимних условиях, существовавших в период формирования этих жил, и/или в процессе замерзания в морозобойной трещине воды, насыщенной песчаными частицами, когда могло происходить сегрегационное льдовыделение из водонасыщенного грунта или изотопный обмен с минералами грунтовых частиц.

Сопоставление изотопных параметров песчано-ледяных жил из нижнего и верхнего песчаных горизонтов показало различие в средних и медианных значениях $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, для ПЛЖ из верхнего песка эти значения оказались ниже в среднем на 1‰ для значений $\delta^{18}\text{O}$ и на 10-11‰ для значений $\delta^2\text{H}$. При этом различие в значениях d_{exs} оказалось статистически незначительным, для ПЛЖ из нижнего горизонта песка также получены высокие средние и медианные значения d_{exs} (34,1 и 33,1‰, соответственно), как и для ПЛЖ из верхнего песка (32,7 и 32,1‰, соответственно). Уравнения соотношения $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ для ПЛЖ нижнего и верхнего песчаных горизонтов имеют близкие значения параметров (наклон линии 8,7 и 8,6). Эти данные показывают, что условия промерзания и формирования ПЛЖ в этих двух горизонтах могли быть довольно близкими.

Сходство изотопного и ионного состава песчано-ледяных жил нижнего и верхнего песка позволяет предположить, что их генезис, вполне вероятно, также аналогичен. Также можно полагать, что и возраст песчано-ледяных жил нижнего и верхнего песка не так уж сильно отличается, как это принято считать, однако для более уверенного суждения об этом необходимо датировать сами песчано-ледяные жилы нижнего песка, а не только вмещающие их отложения.

Выводы

- Песчано-ледяные жилы нижнего песка Батагайского термоцирка залегают преимущественно на глубинах 38-52 м, они имеют ширину преимущественно 0,15-0,2 м и высоту обычно 10-12 м.
- Песчано-ледяные жилы нижнего песка сложены жилками льда мутными желто-коричневыми, шириной от 0,2 до 0,5-1 см с вертикальными и субвертикальными жилками грунта темно-коричневыми, шириной от 0,1 до 0,7 см.
- Значения $\delta^{18}\text{O}$ в песчано-ледяных жилах нижнего песка варьируют от -36,09 до -32,32‰ (средние значения -34,3 и -33,4‰), значения $\delta^2\text{H}$ – от -257,1 до -230,1‰ (средние значения -240,2 и -234,4‰), для всех образцов льда получены очень высокие значения d_{exs} – от 22,5 до 42,4‰ (средние значения 34,1 и 32,8‰).
- Средние значения минерализации песчано-ледяных жилах нижнего песка имеет 332 мг/л, среди катионов преобладают Ca^{2+} , в среднем составляя 66-97 мг/л, а среди анионов SO_4^{2-} , среднее значение - 144-273 мг/л. Наибольший разброс среди катионов отмечен для Mg^{2+} (2-255 мг/л), а среди анионов для NO_3^- (0,1-111,7 мг/л).
- Высказано предположение о существенной генетической и, возможно, хронологической близости песчано-ледяных жил нижнего и верхнего песка Батагайского термоцирка.

Благодарности

Авторы выражают благодарность А.Ю. Тришину за помощь в полевых работах.

Библиография

1. 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 EDN: YHPBIC.
2. Murton J.B., Edwards M.E., Lozhkin A.V., Anderson P.M., Savvinov G.N., Bakulina N., Bondarenko O.V., Cherepanova M.V., Danilov P.P., Boeskorov V., Goslar T., Grigoriev S., Gubin S.V., Korzun J.A., Lupachev A.V., Tikhonov A., Tsygankova V.I., Vasilieva G.V., Zanina O.G. Preliminary paleoenvironmental analysis of permafrost deposits at Batagaika megaslump, Yana Uplands, northeast Siberia // Quaternary Research. 2017. Vol. 87. Pp. 314-330. doi:10.1017/qua.2016.15. EDN: XXRWZN.
3. Murton J.B., Opel T., Toms P., Blinov A., Fuchs M., Wood J., Gärtner A., Merchel S., Rugel G., Savvinov G., Wetterich S. A multimethod dating study of ancient permafrost, Batagay megaslump, east Siberia // Quaternary Research. 2022. Vol. 105. Pp. 1-22. <https://doi.org/10.1017/qua.2021.27>. EDN: GVBUVS.
4. Murton J.B., Opel T., Wetterich S., Ashastina K., Savvinov G.G., Danilov P.P., Boeskorov V. Batagay megaslump: a review of the permafrost deposits, Quaternary environmental history, and recent development // Permafrost and Periglacial Processes. 2023. Vol. 34. Pp. 399-416. doi:10.1002/ppp.2194 EDN: VHPEBN.
5. 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. EDN: JJWPOX.
6. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., Budantseva N.A., Vasil'chuk J.Yu., Ginzburg A.P. Synchronous isotopic curves in ice wedges of the Batagay Yedoma: precision matching and similarity scoring // Permafrost and Periglacial Processes. 2024. Vol. 35. Iss. 3. Pp. 478-492. doi:10.1002/ppp.2243. EDN: ZLLKRH.
7. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., Budantseva N.A., Tokarev I.V., Vasil'chuk J.Yu. Direct AMS radiocarbon age of the MIS 3-2 thin composite wedges from Batagay Upper Sand // Radiocarbon. 2025. Pp. 1-16. doi:10.1017/RDC.2025.10150.
8. Opel T., Murton J.B., Wetterich S., Meyer H., Ashastina K., Günther F., et al. Past climate and continentality inferred from ice wedges at Batagay megaslump in the Northern Hemisphere's most continental region, Yana Highlands, interior Yakutia // Climate of the Past. 2019. Vol. 15. Pp. 1443-1461. DOI: 10.5194/cp-15-1443-2019 EDN: GTPUGY.
9. Васильчук Ю.К., Васильчук Д.Ю., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Тришин А.Ю. Изотопно-геохимические особенности Батагайской едомы (предварительные результаты) // Арктика и Антарктика. 2017. № 3. С. 69-98. DOI: 10.7256/2453-8922.2017.3.24433 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=24433
10. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Васильчук Дж.Ю. Январская палеотемпература воздуха в период МИС-3-2 в северо-восточной Якутии, реконструированная по высокоразрешающей записи изотопного состава сингенетических повторно-жильных льдов Батагайской едомы // Арктика: экология и экономика. 2023. Т. 13, № 4. С. 393-405. doi:10.25283/2223-4594-2023-4-516-528 EDN: AJYGXM.
11. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Васильчук Дж.Ю., Гинзбург А.П. Оценка подобия изотопных диаграмм по двум синхронным соседним ледяным жилам Батагайской едомы // Lomonosov Geography Journal. Вестник МГУ, серия география. 2025. Том 80. № 3. С. 86-95. doi:10.55959/MSU0579-9414.5.80.3.7. EDN: QYQIHW.

12. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // *Tellus*. 1964. N 16. Pp. 436-468. doi:10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x.
13. Shapiro S.S., Wilk M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples) // *Biometrika*. 1965. No. 523-524. Pp. 591-611. doi:10.1093/biomet/52.3-4.591.
14. Mann H.B., Whitney D.R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other // *Annals of Mathematical Statistics*. 1947. No. 18. Pp. 50-60. doi:10.1214/aoms/1177730491.
15. Welch B.L. The generalization of 'Student's' problem when several different population variances are involved // *Biometrika*. 1947. Vol. 34. No. 1-2. Pp. 28-35. doi:10.1093/biomet/34.1-2.28. EDN: ILNZPH.
16. Васильчук Ю.К. Геохимический состав подземных льдов севера Российской Арктики // Арктика и Антарктика. 2016. № 2. С. 99-115. DOI: 10.7256/2453-8922.2016.2.21378 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=21378
17. Kim S., Lee H., Kim J. et al. East Siberian ice wedges recording dust transport variability during the Late Pleistocene // *Nat. Commun.* 2025. Vol. 16. N9751. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-65772-2>.
18. Tikhonravova Y., Torgovkin N., Lupachev A. Formation of wedge structures in the permafrost deposits of the Batagay megaslump (Yana Highlands, North-East Siberia) // *Journal of Sedimentary Research*. 2025. <https://doi.org/10.2110/jsr.2024.146>.
19. Murton J.B., Opel T., Toms P., Wood J., Boxleitner K., Savvinov G., Danilov P., Boeskorov V., Goslar T., Rogers G., Lupachev A., Tikhonravova Y. Preliminary paleoenvironmental analysis and luminescence dating of upper Middle Pleistocene permafrost deposits of the Ulakhan Sular Formation, Adycha River, east Siberia // *Quaternary Research*. 2025. Vol. 124. Pp. 1-25. <https://doi.org/10.1017/qua.2024.36> EDN: CYJXRO.
20. Opel T., Wetterich S., Meyer H., Dereviagin A.Y., Fuchs M.C., Schirrmeyer L. Ground-ice stable isotopes and cryostratigraphy reflect late Quaternary palaeoclimate in the Northeast Siberian Arctic (Oyogos Yar coast, Dmitry Laptev Strait) // *Climate of the Past*. 2017. Vol. 13. Pp. 587-611. doi:10.5194/cp-13-587-2017. EDN: XNKSAT.
21. Schirrmeyer L. et al. Periglacial landscape evolution and environmental changes of Arctic lowland areas for the last 60 000 years // *Polar Research*. 2008. Vol. 27. No. 2. Pp. 249-272. doi:10.1111/j.1751-8369.2008.00067.x EDN: LKZWER.
22. Деревягин А.Ю., Куницкий В.В., Мейер Х. Песчано-ледяные жилы на крайнем севере Якутии // Криосфера Земли. 2007. Т. XI. № 1. С. 62-71.
23. Kostrova S.S., Meyer H., Fernando F., Werner M., Tarasov P.E. Moisture origin and stable isotope characteristics of precipitation in southeast Siberia // *Hydrological Processes*. 2020. Vol. 34. Pp. 51-67. doi:10.1002/hyp.13571. EDN: DRLZFT.
24. Kurita N., Sugimoto A., Fujii Y., Fukazawa T., Makarov V.N., Watanabe O., Ichiyangagi K., Numaguti A., Yoshida N. Isotopic composition and origin of snow over Siberia // *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110. D13102. <https://doi.org/10.1029/2004JD005053>. EDN: LJHXCR.
25. Yang Y., Wu Q., Guo X., Zhou L., Yao H., Zhang D., Zhang Z., Chen J., Liu G. First comprehensive stable isotope dataset of diverse water units in a permafrost-dominated catchment on the Qinghai-Tibet Plateau // *Earth System Science Data*. 2024. Vol. 16. Pp. 3755-3770. <https://doi.org/10.5194/essd-16-3755-2024>. EDN: XMLPGB.
26. Pope E.C. Hydrogen and oxygen isotope fractionation in hydrous minerals as indicators of fluid source in modern and fossil metasomatic environments. Thesis. Stanford University, 2011. 225 p.
27. Sheppard S.M.F. Stable Isotope Geochemistry of Clay Minerals // *Clay Minerals*. 1996. Vol. 31(1). Pp. 1-24.

28. Васильчук Ю.К. Концентрация основных растворимых ионов в композитных песчано-ледяных жилах в толще верхнего песка Батагайского разреза // Арктика и Антарктика. 2025. № 1. С. 16-43. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.1.73228 EDN: QBFPIY URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=73228
29. Vasil'chuk, Yu. K. Ionic composition of Late Pleistocene composite sand-ice wedges of the Upper Sand unit of the Batagay megaslump [dataset] // PANGAEA. 2025. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.984509>
30. 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://nbpublish.com/library_read_article.php?id=71272
31. Vasil'chuk Yu. K Ionic composition of late Pleistocene ice wedges (IW-17 and IW-20) of the Batagay yedoma, Verkhoyansk District of Yakutia [dataset] // PANGAEA. 2025. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.982502>
32. Васильчук Ю.К. Концентрация основных растворимых ионов в ледяных жилах ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7 Батагайской едомы // Арктика и Антарктика. 2024. № 4. С. 57-80. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.4.72210 EDN: LBJOHS URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=72210
33. Vasil'chuk Yu. K. Ionic composition of late Pleistocene ice wedges (IW-5 and IW-7) of the Batagay yedoma, Verkhoyansk District of Yakutia [dataset] // PANGAEA. (2025). <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.982509>

Результаты процедуры рецензирования статьи

Рецензия выполнена специалистами [Национального Института Научного Рецензирования](#) по заказу ООО "НБ-Медиа".

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

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

Предметом статьи является изотопная и геохимическая характеристика песчано-ледяных жил из толщи Батагайского нижнего песка.

Ведение статьи начинается сразу с описания объекта исследования. Считаем, что в введении статьи необходимо отразить актуальность, новизну исследования, цели и задачи.

Описание объекта исследования - Батагайского термоцирка наиболее целесообразно представить в разделе «Условия и место проведения исследования».

Актуальность исследования авторы обосновывают тем, что имеющиеся противоречивые данные разнообразного датирования и заметное морфологическое, криолитологическое сходство песчаных толщ с песчано-ледяными жилами, обозначаемых как верхние пески и нижние пески, побудило рассмотреть сходства и различия изотопно-геохимического состава песчано-ледяных жил обеих песчаных свит. Это может послужить доказательством близости их возраста и генезиса, или подтвердить существенные различия их возраста как это принято в большинстве публикаций.

В связи с этим, целью исследования является характеристика изотопно-геохимических особенностей композитных песчано-ледяных жил (ПЛЖ) в толще нижнего песка и сравнение их с аналогичными жилами в толще верхнего горизонта песка, критическое рассмотрение возрастных привязок времени формирования ПЛЖ толщи нижнего песка. Методология исследования основана на полевом методе отбора образцов льда из композитных ПЛЖ, с дальнейшим их анализом. Отобрано 52 образца, химический анализ которых проведен с помощью ионного хроматографа «Стайер» (Россия),

предназначенном 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. Измерения изотопного состава кислорода и дейтерия ($\delta^{18}O$ и δ^2H) во льду ПЛЖ выполнены на масс-спектрометре *Delta-V Plus*. Для оценки значимости статистических различий в изотопном составе песчано-ледяных жил проводилась проверка нормальности распределения с помощью теста Шапиро-Уилка. Нормально распределённые величины сравнивались по *t*-критерию Уэлча, отличающиеся от нормальных, сравнивались с помощью *U*-критерия Манна-Уитни.

Новизна проводимых исследований заключается в авторском подходе к реализации поставленных научных задач.

Стиль статьи – научно-теоретический, объём статьи соответствует требованиям журнала. Статья содержит достаточно теоретического материала и авторского экспериментального материала, который насыщен таблицами, графиками, рисунками, статистическими расчетами. Авторами в ходе исследования установлено, что по параметрам наклона линии соотношения δ^2H - $\delta^{18}O$ жилы нижнего песка близки к жилам из верхнего песчаного горизонта, для которых эта линия имеет близкий к ГЛМВ наклон (8,6), но при этом расположена выше ГЛМВ. Сопоставление изотопного состава песчано-ледяных жил Батагайского разреза с подобными жилами в других районах их распространения показали ряд общих особенностей.

Библиография статьи очень обширная и включает в себя 33 литературных источника, 25 из которых – на иностранных языках.

Выводы в статье достаточно аргументированы и обоснованы. Авторы отмечают, что сходство изотопного и ионного состава песчано-ледяных жил нижнего и верхнего песка позволяет предположить, что их генезис, вполне вероятно, также аналогичен. Также можно полагать, что и возраст песчано-ледяных жил нижнего и верхнего песка не так уж сильно отличается, как это принято считать. Высказано предположение о существенной генетической и, возможно, хронологической близости песчано-ледяных жил нижнего и верхнего песка Батагайского термоцирка.

Статья имеет важное научно-теоретическое значение. Однако, практическая значимость статьи авторами, к сожалению, не отражена. В тексте статьи имеются опечатки. Например, в первом абзаце сверху: «Багагайский термоцирк», вместо «Батагайский термоцирк».

Однако, отмеченные замечания и пожелания не умаляют значимости данной статьи. Рецензируемая статья рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика» после устранения замечаний.

Результаты процедуры повторного рецензирования статьи

Рецензия выполнена специалистами [Национального Института Научного Рецензирования](#) по заказу ООО "НБ-Медиа".

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

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

Рецензия на статью

«Изотопная и геохимическая характеристика композитных песчано-ледяных жил

нижнего песка Батагайского термоцирка»

1. Предмет исследования.

Статья посвящена комплексному изотопно-геохимическому исследованию композитных песчано-ледяных жил (ПЛЖ) в толще нижнего песка Батагайского термоцирка (Якутия). Исследование посвящено изучению состава ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, d_{exs} , ионный состав), криостратиграфического положения и пространственной вариативности ПЛЖ. Проведено сравнение показателей с аналогами из верхнего песчаного горизонта. Исследования позволяют оценить условия формирования и возможную хронологическую близость отложений и имеют важное значение для реконструкции палеоклиматических условий Северо-Восточной Сибири в плейстоцене.

2. Методология исследования.

Исследование выполнено с соблюдением общепринятых методологических принципов, характерных для работ данного профиля. Отбор проб проведен с соблюдением методик криолитологических исследований. При отборе проб использованы буровые инструменты (дрели Makita, Bosch со стальными коронками для льда), была обеспечена защита от поверхностного загрязнения, а также зафиксированы GPS-координаты. Лабораторные измерения выполнены с применением современного оборудования (ионный хроматограф «Стайер», масс-спектрометр Delta-V Plus). Калибровка проведена по международным стандартам (VSMOW, SLAP, GRESP). Погрешность определение незначительная. Для оценки значимости проведена проверка нормальности распределения с помощью теста Шапиро-Уилка. Нормально распределенные величины оценивали по t -критерию Уэлча, величины, отличающиеся от нормальных – по U -критерию Манна-Уитни. Оценка значимости результатов проведена на уровне значимости 0,01. Для проведения расчетов и визуализации использованы современные инструменты программного анализа на языке Python (Jupyter Notebook с использованием библиотек Pandas, NumPy, Matplotlib).

3. Актуальность.

Работа имеет высокую научную и практическую значимость в условиях ускоренного потепления Арктики и усиления термоденудационных процессов в криолитозоне. Батагайский термоцирк – крупнейший в мире участок естественного разрушения многолетнемерзлых пород. Он дает возможность изучать глубокие (до 90 м), практически недеформированные плейстоценовые отложения, в т. ч. редкие композитные песчано-ледяные жилы. Такие объекты служат «криогенными архивами». Их изотопно-геохимический состав позволяет реконструировать зимние климатические условия прошлого. Уточнение возраста и генезиса этих структур критически важно для стратиграфической корреляции четвертичных отложений Северо-Восточной Сибири и для повышения надежности климатических моделей. Понимание условий формирования и устойчивости композитных песчано-ледяных жил имеет прямое прикладное значение для оценки темпов и масштабов деградации многолетнемерзлых пород в XXI веке, а также для прогнозирования рисков для инфраструктуры, устойчивости экосистем и потенциальных выбросов парниковых газов из оттаивающих криогенных отложений.

4. Научная новизна

Работа вносит значимый вклад в науку по нескольким направлениям:

- Впервые получены детальные вертикальные профили $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d_{exs} по двум композитным ПЛЖ нижнего песка с шагом 10-20 см. Это позволяет проследить микровариации, связанные с процессом формирования жил.
- Продемонстрирована статистически значимая разница по $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ между ПЛЖ верхнего и нижнего песка, но при этом статистически незначимая разница по d_{exs} .
- Показана высокая минерализация ПЛЖ нижнего песка (до 823 мг/л), доминирование

сульфатов (до 868 мг/л) и кальция, что отличает их от ледяных жил едомы и сближает с ПЛЖ верхнего песка.

- Предложена гипотеза о генетической и, возможно, хронологической близости ПЛЖ верхнего и нижнего песка. Эта гипотеза ставит под сомнение сложившееся представление об огромном возрастном разрыве между ними и требует пересмотра стратиграфических схем региона.

5. Стиль, структура, содержание.

Статья написана в академическом стиле, характерном для высокорейтинговых геокриологических журналов. Текст изложен ясно, лаконично, с полным соблюдением логики статьи. Графический материал качественно подготовлен, информативен, соответствует содержанию текста. Таблицы оформлены корректно, содержат все необходимые статистические параметры. Статья содержит научную интерпретацию: раскрываются механизмы, генетические связи и палеоклиматические следствия полученных данных. Такой уровень рассуждений значительно повышает уровень работы.

5. Библиография.

Список литературы (33 источника) подобран убедительно. Он сочетает как фундаментальные работы (Dansgaard, 1964; Shapiro, Wilk, 1965), так и работы, опубликованные в последние годы (2024-2025 гг.). Все цитирования уместны и подкрепляют аргументацию.

6. Апелляция к оппонентам.

В исследовании открыто обсуждаются противоречивые данные по возрасту нижнего песка (от ~50 до >600 тыс. лет). В статье проводится критическая оценка «некондиционной» AMS-датировке по органике из жилы. Также обосновывается ограниченность текущих хронологических маркеров и содержится указание на необходимость прямого датирования самих ПЛЖ нижнего песка в будущем.

7. Выводы и читательская аудитория.

Выводы сформулированы четко, обоснованы данными и соответствуют поставленной цели. Они могут быть интересны широкому кругу специалистов. Статья будет востребована как в России, так и за рубежом, особенно в свете растущего интереса к «криогенным архивам» в условиях климатического кризиса.

Заключение

Статья выполнена на высоком научном уровне. Постановка проблемы актуальна, методология точна и современна, результаты обладают новизной и значимостью, изложение логично и доступно. Работа вносит весомый вклад в понимание генезиса и возраста криогенных отложений Северо-Восточной Сибири и заслуживает высокой оценки.

Рекомендую опубликовать.