

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П., Токарев И.В., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Паламарчук В.А., Васильчук Д.Ю., Блудушкина Л.Б., Слышикина Е.С. Стабильные изотопы кислорода и водорода в сезонных буграх пучения в долине р. Чара, Забайкалье // Арктика и Антарктика. 2024. № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.2.70706 EDN: VQZHAS URL: https://nbppublish.com/library_read_article.php?id=70706

Стабильные изотопы кислорода и водорода в сезонных буграх пучения в долине р. Чара, Забайкалье

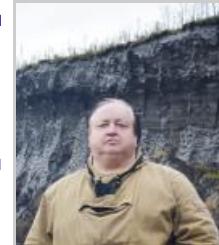
Васильчук Юрий Кириллович

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

Гинзбург Александр Павлович

младший научный сотрудник; ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» и Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН

629007, Россия, г. Салехард, ул. Республики, 20



✉ alexandrginzburg13154@yandex.ru

Токарев Игорь Владимирович

кандидат геолого-минералогических наук

ведущий специалист; Научный парк Санкт-Петербургского государственного университета

199034, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Университетская, 7



✉ tokarevigor@gmail.com

Буданцева Надежда Аркадьевна

кандидат географических наук

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

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



✉ nadin.budanceva@mail.ru

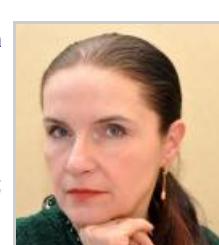
Васильчук Алла Константиновна

ORCID: 0000-0003-1921-030X

доктор географических наук

ведущий научный сотрудник; Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова; географический факультет; НИЛ Геоэкологии Севера и географии почв

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



✉ alla-vasilch@yandex.ru

Паламарчук Валентина Анатольевна

младший научный сотрудник; Научный центр изучения Арктики и Институт криосферы Земли СО РАН
629007, Россия, г. Салехард, ул. Республики, 20
✉ VAPalamarchuk@yanao.ru



Васильчук Дже́ссика Юрьевна

младший научный сотрудник; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова;
географический факультет; кафедра геохимии ландшафтов и географии почв
119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 2007

✉ jessica.vasilchuk@gmail.com



Блудушкина Любовь Бахтияровна

младший научный сотрудник; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова;
географический факультет; Научно-исследовательская лаборатория геоэкологии Севера
119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 2007

✉ bludushkina19@mail.ru



Спышкина Елена Сергеевна

младший научный сотрудник; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
географический факультет; Научно-исследовательская лаборатория геоэкологии Севера и Начальник
лаборатории АО "Атомэнергопроект"

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

✉ lena.slyshkina@gmail.com



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

DOI:

10.7256/2453-8922.2024.2.70706

EDN:

VQZHAs

Дата направления статьи в редакцию:

11-05-2024

Аннотация: Предметом исследования является распределение изотопного состава кислорода и водорода во льду сезонных бугров пучения в долине р. Чара. В центральной части Восточной Сибири распространены сплошные по вертикали и латерали многолетнемерзлые породы, их свойства неоднократно изменяются на относительно небольших участках территории, особенно на территории Чарской котловины, расположенной в северном Забайкалье в окружении горных хребтов Кодар и

Удокан. На территории котловины общей площадью не более 130 кв. км широко распространены криогенные процессы, оказывающие значительное влияние на мосты, дорожное полотно, ЛЭП и объекты горнодобывающей промышленности (ГМК «Удоканская медь» и др.). Одним из таких процессов является криогенное (морозное) пучение грунтов. Летом 2023 г. авторами были описаны два сезонных бугра пучения в заболоченных залесённых понижениях на периферии Чарских песков (в термосуффозионных воронках). Были отобраны образцы льда из ядер бугров, изучен изотопный состав кислорода и водорода во льду ядер сезонных бугров пучения. Установлено, что сезонные бугры пучения формируются преимущественно за счет промерзания переувлажненного сезонно-talого слоя сверху-вниз, иногда часть льда намерзает снизу-вверх при встречном промерзании пород на нижней границе СТС. Распределение значений изотопного состава по вертикали, его облегчение сверху-вниз, а также соотношение $\delta^{2H}-\delta^{18O}$ во льду указывает на сравнительно быстрое промерзание воды, сверху-вниз, в условиях закрытой системы, в течение одного цикла. В слоях льда, отобранных по горизонтали, получены очень близкие значения изотопного состава (например в бугре 1 по значениям δ^{18O} от -17,51 до -17,32‰), что указывает на последовательное горизонтальное намораживание слоев льда. Наклоны линий соотношения $\delta^{2H}-\delta^{18O}$ для льда бугров составляют 5,82 (бутор 1) и 5,95 (бутор 2). Наклон линии соотношения $\delta^{2H}-\delta^{18O}$ меньше 8-7,3 указывает на промерзание воды в условиях закрытой системы, в течение одного цикла, без подтока влаги. Распределение изотопных значений во льду бугра 2 может указывать на одновременное двустороннее промерзание объема воды.

Ключевые слова:

многолетнемерзлые попроды, сезонные бугры пучения, ледяное ядро, изотопы кислорода, изотопы водорода, сегрегационное ледяное ядро, инъекционное ледяное ядро, сезонно-talый слой, Чарская котловина, Северное Забайкалье

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда (грант № 23-17-00082 - полевые исследования и обобщение данных). Изотопные измерения выполнены в Ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета в рамках программы ГЗ №АААА-А19-119091190094-6.

Введение

Криогенное пучение грунтов, выражющееся в увеличении объема грунта ввиду промерзания содержащейся в нем гравитационной влаги, способно наносить значительный урон линейным и площадным сооружениям.^[1,2] Интенсивность криогенных процессов и динамика свойств мерзлотных форм рельефа находятся в тесной связи с климатическими условиями. Определение закономерностей динамики свойств криогенных процессов и явлений, а также установление характера ее связи с климатическими изменениями на современном этапе – одна из приоритетных геокриологических задач^[3]). Криолитозона северного Забайкалья за последние 60 лет претерпела значительную трансформацию под влиянием климатических изменений. Так, произошло сдвигание южных границ областей распространения ММП и сплошного распространения ММП на несколько сотен км к северу.^[4] Это привело к активизации многочисленных экзогенных геологических процессов, связанных с вытаиванием льда

ММП – течению каменных глетчеров, заболачиванию, термокарсту и термоэрозии. [\[4.5\]](#)

В Забайкалье сезонные бугры пучения наиболее широко развиты в днищах падей и долин впадающих притоков в суглинистых, влажных, заторфованных грунтах. Кроме того, они встречаются на заболоченных и замшелых участках террас, а также на пологих склонах водоразделов. Основным источником питания сезонных бугров являются надмерзлотные воды. [\[6\]](#)

Е.А.Втюрина [\[7\]](#) отмечала, что глубокое летнее протаивание грунтов района благоприятно для сезонного пучения, многолетние же бугры здесь встречаются редко. Сезонные и многолетние бугры пучения и термокарст, связанный здесь с инъекционными льдами, развиты слабо в Нерчинском районе. А в Верхне-Аргунском подрайоне многолетние бугры пучения особенно многочисленны в верховьях р.Урулунгуйя. К югу количество и размеры их заметно сокращаются.

Сезонные бугры пучения распространены на всей территории Юго-Восточного Забайкалья, особенно в его центральной части. Диаметр их колеблется от 2-3 до 20-30 м, высота – от 0,5-1 до 2-3 м. Длина продолговатых бугров, как установлено И.Я.Барановым [\[8\]](#), иногда достигает 100 м, а ширина их 1,5-2 м.

Строение сезонных бугров также различно: среди них встречаются и бугры с ледяным ядром, и бугры с ядром из чередующихся ледяных и грунтовых прослоек. Последние наблюдались близ с.Удыча, около рудника Абагайтуй. Сезонные бугры обычно приурочены к днищам долин, падей и котловин и к подножиям склонов преимущественно южной экспозиции. [\[7\]](#)

Чарская котловина – один из немногих районов северного Забайкалья, где были встречены сезонные бугры пучения с мощным ледяным ядром (рис. 1-6), однако детальных сведений о них немного, [\[9\]](#) а изотопных характеристик почти нет, в связи с чем изучение их морфологических и изотопно-геохимических свойств весьма актуально. Можно с уверенностью утверждать, что сезонные бугры пучения встречающиеся в Чарской котловине являются едва ли не самыми выразительными сезонными криогенными образованиями в криолитозоне России и содержат ледяные линзы достигающие мощности 1-2 м, диаметром в несколько десятков метров (см. рис. 1-3).

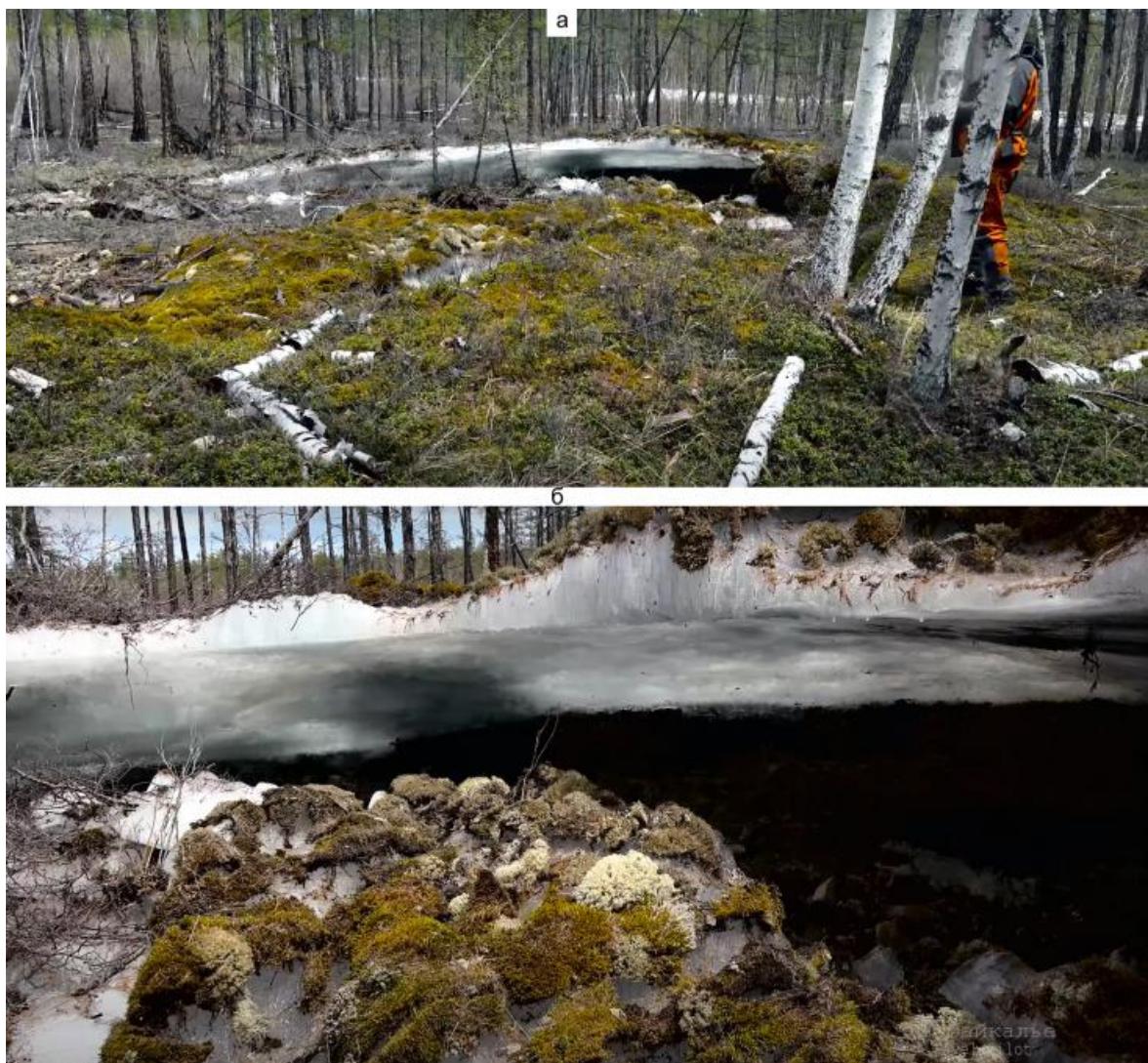


Рис. 1. Сезонный инъекционный бугор пучения в Чарской котловине в Забайкалье: а – общий вид, б – ледяная линза в верхней части бугра. Фото Pavel Pilot, с сайта: <https://yandex.ru/video/preview/6028501455540695274>

Весной во время максимального подъема грунтов размеры однолетних бугров пучения достигают 10 м в высоту и от 20 до 100 м в поперечнике. Обычно большие величины пораженности пучением грунтов характерны для узких (80-100 м) участков долин, где на фоне развития сегрегационного пучения формируются зоны с инъекционным пучением, а в сумме пучение достигает значительных величин. Например, в падях Кислой и Сенной (Читинская область) высота инъекционных бугров пучения достигает 8-9 м при диаметре 30-50 м, а в Муйской и Чарской впадинах, по долинам рек Хана, Олёнка и Нюкжа, высота бугров пучения варьирует от 1,5 до 10 м, диаметр – от 20 до 100 м. Многолетние бугры пучения встречаются в указанных выше впадинах и долинах рек, а в долине р.Шилки В.К.Лапердин наблюдал бугры пучения высотой 7-8 м и диаметром 40-50 м, которые сохранились не более трех лет и исчезали. Возраст “долгожителей” – многолетних бугров пучения в Чарской котловине – достигал 300 лет, высота 16 м, диаметр – 80-100 м. Разрушение крупных многолетних бугров в рельефе выражается термокарстовыми провалами, воронками, озерами, площадью до 0,5 км².^[10]



Рис. 2. Сезонный инъекционный бугор пучения с мощной ледяной линзой под метровым слоем торфа в верхней части бугра в Чарской котловине, в Забайкалье. Фото В.Г. Подгорбунского



Рис. 3. Сезонный инъекционный бугор пучения с мощной ледяной линзой в Чарской котловине, в Забайкалье. Фото В.Г. Подгорбунского



Рис. 4. Сезонный инъекционный бугор пучения, в Чарской котловине в Забайкалье. Фото А.Гинзбурга

Сезонные бугры пучения в Чарской котловине уже в начале лета начинают активно протаивать и распадаться (рис. 5) и к концу лета на месте протаивания ледяных ядер сезонных бугров пучения остаются внушительные воронки, глубиной до 1 м и более (рис. 6).



Рис. 5. Вытаивающее ледяное ядро сезонного торфяного бугра пучения вблизи Чарских песков в июле 2022 г. Фото В.Паламарчук



Рис. 6. Воронки на месте пропаивания сезонных бугров пучения в Чарской котловине, в Забайкалье. Фото А.Гинзбурга

Целью работы является детальное исследование изотопного состава линз льда в ядре сезонных бугров пучения в Чарской котловине, выявление направления и условий промерзания, зафиксированных в изотопной записи, установление изотопного состава воды из которой сформировались ледяные линзы в ядре сезонных бугров пучения и сопоставление изотопных кривых по льду сезонных бугров пучения в Чаре с изотопными данными изо льда сезонных бугров, исследованных в разных районах криолитозоны России и Канады.

Физико-географические условия района исследования

Песчаный массив Чарские пески расположен на междуречье рек Верхний и Средний Сакукан в центральной части Чарской котловины ($56^{\circ}50'43.61''$ с.ш., $118^{\circ}08'25.78''$ в.д.),

его площадь составляет примерно $9,5 \times 3,6$ км, а абсолютная высота достигает 811 м (рис. 7).

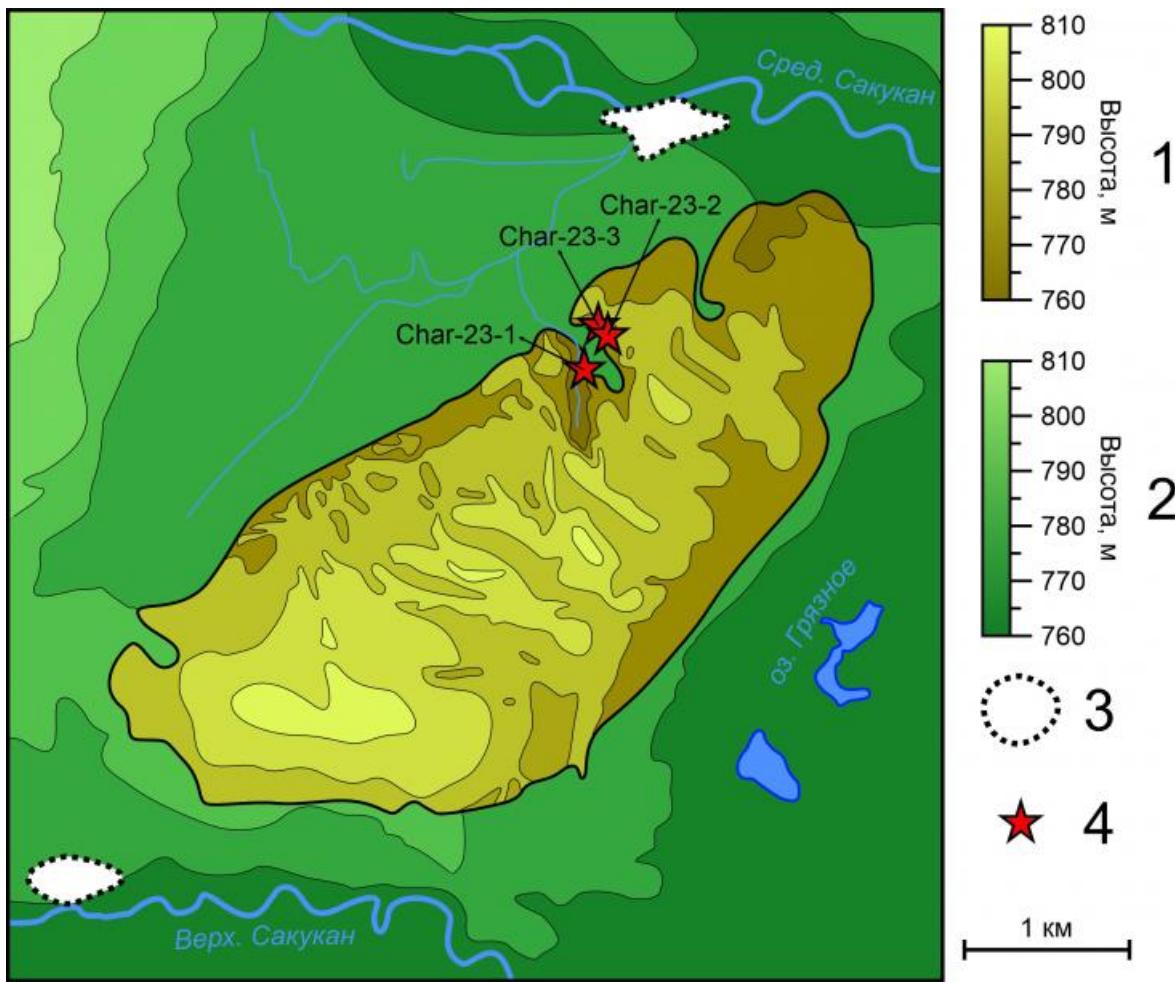


Рис. 7. Картосхема района исследований вблизи Чарских песков: 1 – шкала высот песчаного массива; 2 – шкала высот окружающей местности; 3 – места формирования наледей; 4 – места расположения исследованных бугров пучения.

Сам массив представляет собой череду незакреплённых перевеваемых песчаных дюн, в основном серповидных по форме. Слоны массива, особенно в южной и юго-восточной частях весьма крутые, достигают $35-35^\circ$, в северной части – более пологие. В северной части песчаного массива также часто наблюдаются воронкообразные залесённые и заболоченные понижения, развитые в условиях ухудшенного дренажа. По этим понижениям идёт разгрузка подземных вод песчаных массивов, в них образуются ручьи и протоки, а также формируется относительно прохладный микроклимат.

Геолого-геоморфологические особенности территории

Толща дочетвертичных отложений представлена мощным складчатым фундаментом преимущественно магматического прохождения. Среди пород фундамента доминируют архео-протерозойские граниты, гранодиориты, габбро, габбро-дориты и др., пронизанные нижнепротерозойскими и позднеюрскими интрузиями.^[11] На некоторых участках территории поверхность сложена осадочной мел-четвертичной толщей, большая часть днища котловины сложена полигенетичным четвертичным чехлом, мощность которого варьирует в зависимости от проявлений дочетвертичного рельефа. Предгорные части днища котловины сложены ледниками, водно-ледниками и склоновыми песками, супесями и валунными суглинками. Ближе к руслу р. Чары большая часть сложена позднечетвертичным, в т.ч. голоценовым аллювием – средними и крупными

песками с прослойями дресвы и галечника.[\[12\]](#)

Сложенные скальными породами коренные склоны хребтов Кодар, более крутые, и Удокан, более пологие, спускаются в выположенное дно Чарской котловины, рельеф которого местами осложнён конечно-моренными грядами и водно-ледниковыми террасами, а также подгорными шлейфами, в отложениях которых содержатся обломки скальных пород. Наиболее низкие геоморфологические уровни – поймы и низкие надпойменные террасы, возвышаются в среднем на 5–10 м над уровнем воды.[\[13\]](#) Отложения террас и пойм р. Чары и её притоков содержат повторно-жильные льды, активное вытаивание которых приводит к образованию многочисленных оврагов и промоин, а также к быстрому отступанию берегов.

Многолетнемёрзлые породы и криогенные процессы

Чарская котловина расположена в области сплошных низкотемпературных многолетнемерзлых пород (ММП), однако ввиду расчленённости рельефа, разнообразия их экспозиций и неоднородности свойств почвенно-растительного покрова проявляется пестрота температурного поля и льдистости ММП.[\[14,15\]](#) Наиболее низкие температуры ММП на глубинах нулевых сезонных колебаний наблюдаются в курумах склонов хребта Удокан, она составляет около $-9,4^{\circ}\text{C}$.[\[15\]](#) В ландшафтах подгорных шлейфов, песчаных и супесчаных террас температуры ММП изредка достигают значений -4 , -3°C , а на незадернованных песчаных массивах наподобие Чарских песков эта температура вообще положительна – примерно $+0,3^{\circ}\text{C}$.[\[15,16\]](#) Под руслами рек распространены несквозные таликовые зоны.[\[17\]](#) Сезонное протаивание в Чарской котловине начинается в начале мая и заканчивается в октябре. Глубокому промерзанию в зимний период способствуют невысокая мощность снежного покрова, а также в среднем небольшая мощность растительного покрова. Средние максимальные мощности сезонноталого слоя (СТС) достигают 1–1,5 м, а на перевеваемых песчаных массивах она составляет 6–8 м, при этом в их толще сформированы ММП несливающегося типа – на глубине 8–15 м пески имеют оклонулевые положительные температуры.[\[15,18,19\]](#)

На относительно небольшой площади Чарской котловины развиты разнообразные криогенные процессы и явления. К наиболее распространённым относятся комплексы склоновых процессов двух типов – гольцового среднегорья и редколесно-таёжного средне- и низкогорья.[\[14\]](#) К первому типу относятся активная криогенная десерпция, подповерхностный смыв, гольцовое льдообразование, криогенное выветривание и др. Особенностью строения гольцово-тундровых склонов горных хребтов являются многочисленные курумы – массивы щебня и каменных глыб с ММП в основании.[\[19,20\]](#) Ко второму типу относятся термоэрзия и термосолифлюкция, видоизменяющие мезо- и микрорельеф склонов, сформированный в холодное время среднего и позднего плейстоцена.[\[21\]](#) Криогенные растрескивание и пучение пород весьма широко распространены на равнинных частях территории Северного Забайкалья, Южной Якутии и Дальневосточного региона.[\[9,14\]](#) На реках в результате разгрузки подземных вод образуются мощные наледи, часто разрушающие пути сообщения и изменяющие морфологию русел.[\[22\]](#)

Климатические условия

Чарская котловина расположена в области резко-континентального климата, при этом положение между высокими и протяжёнными горными хребтами способствует

значительной изоляции этой территории от региональной атмосферной циркуляции, выводя на первый план локальные микроклиматические особенности – в первую очередь, горно-долинную циркуляцию воздуха.

Среднегодовая температура воздуха в Чаре составляет $-6,6^{\circ}\text{C}$ за счёт очень низких зимних температур. Самый холодный месяц в течение года – январь, температура которого в среднем за период наблюдения опускалась до $-31,8^{\circ}\text{C}$, а самый тёплый – июль, когда воздух в среднем прогревался до $+16,8^{\circ}\text{C}$. Минимальная температура за период метеонаблюдений установилась в феврале 1969 г., она достигла $-56,2^{\circ}\text{C}$, максимальная – в июне 1954 г., она составляла $+35,0^{\circ}\text{C}$ (рис. 8). Переходы температуры воздуха через отметку 0°C в Чаре наблюдается в основном в первой половине апреля и в конце сентября – начале октября. Годовой ход температуры воздуха имеет довольно плавную форму. Рост среднегодовой температуры воздуха за период последних 85 лет относительно невысок, градиент роста температуры воздуха в январе равен $0,046^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (или $0,44^{\circ}\text{C}/10$ лет), градиент роста температуры июля – $0,01^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ($0,09^{\circ}\text{C}/10$ лет), а роста среднегодовой температуры воздуха – $0,024^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ($0,22^{\circ}\text{C}/10$ лет). Таким образом, зимние и среднегодовые температуры растут медленно, а летние – ещё медленнее (см. рис. 8).

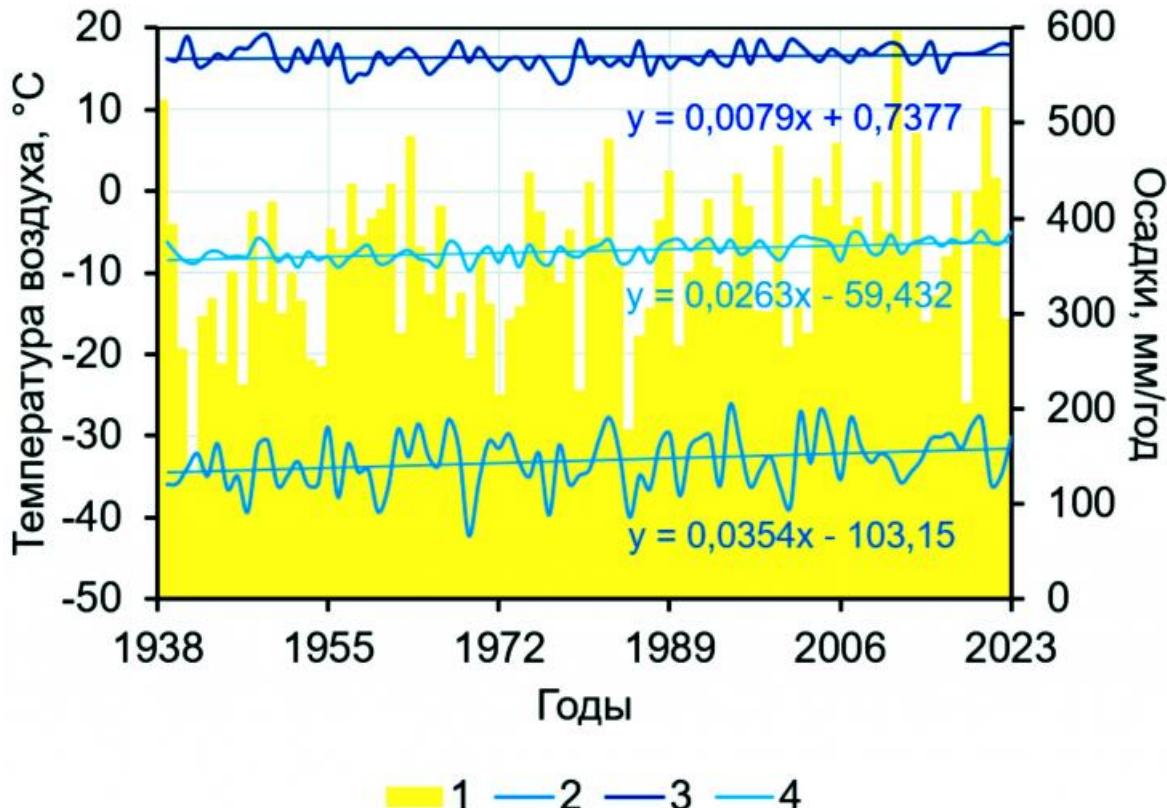


Рис. 8. Климат в пос. Чара в период с 1938 по 2023 гг.: 1 – среднегодового количества осадков; средние температуры воздуха: 2 – января; 3 – июля; 4 – за год; и уравнения линий тренда роста температур воздуха за этот период (по данным метеостанции Чара [23]).

Среднее количество осадков, выпадающее здесь в год, составляет 381 мм. Варьирование в течение периода последних 85 лет происходило в широких пределах – от 132 до 596 мм/год. Внутригодовое распределение осадков крайне неоднородное, в зимние месяцы количество осадков редко превышает 5 мм/мес, весной это количество возрастает примерно в 10–20 раз (до 50–100 мм/мес), а летом достигает 120–150 мм и более. С резкими повышениями количества выпадающих осадков связаны мощные весенне-летние половодья на реках. [24]

Почвенный и растительный покров

Почвенный покров днища котловины отличается невысокой мозаичностью, в его структуре преобладают глеевёмы и торфяно-глеевёмы преимущественно песчаного гранулометрического состава под влажными осоковыми, осоково-моховыми и осоково-разнотравными растительными сообществами. Они формируются на аллювиальных песках, также небольшие ареалы торфяно-глеевёмов образуются на суглинистых заторфованных озёрных и озёрно-аллювиальных отложениях отложениях в условиях неглубокого (до 0,5 м) от поверхности залегания кровли ММП. На возвышенных участках рельефа, сложенных крупнозернистыми хорошо сортированными песками, под редколесьями лиственницы сибирской (*Larix sibirica*), развиваются мощные профили подзолов иллювиально-железистых, глубоко прорастающих в тёплое время года. [\[25\]](#) В пределах песчаного массива Чарские пески образованы фрагментарные ареалы псаммозёмов, перемежающиеся широкими пространствами незадернованных песков. [\[26\]](#)

Вертикальные распределения валового содержания химического состава почв характеризуются относительно монотонными распределениями большей части макроэлементов – Mg, Ca, Ti, Mn. Их средние содержания относительно невысоки – до 1% (реже до 2,5). Верхние части профилей почв на песчаных породах в основном обеднены макроэлементами, за исключением Mg. Значения коэффициентов радиальной дифференциации в верхних частях профилей составляют от 0,3 до 0,7. Горизонт ММП, в сравнении с горизонтами СТС почвы, обогащены некоторыми элементами, например, Si (валовое содержание равно 9–25%) и Al (1,3–2,4%). [\[27\]](#) Наиболее распространёнными типами радиальной почвенно-геохимической структуры криогенных ландшафтов Чарской котловины являются сочетания лессивированного и иллювиального типа в пределах катены вблизи пгт. Новая Чара, а также гумусово-элювиального и гумусово-иллювиального в рамках катены национального парка «Кодар» (Чарские пески). Латеральная почвенно-геохимическая структура свидетельствует об относительной однородности распределений большей части химического состава почв. [\[28,29\]](#)

Объекты исследования

Объекты исследований представляют из себя три относительно невысоких сезонных торфяных бугра пучения, расположенных в северо-западной части песчаного массива Чарские пески в понижениях, возникших в результате размывания песчаного массива течением подземных вод (рис. 9). Исследованные бугры имеют высоты 80–120 см, верхние 20 – 30 см торфа в момент исследования были оттаявшими, ниже располагался мёрзлый торф и слои льда.

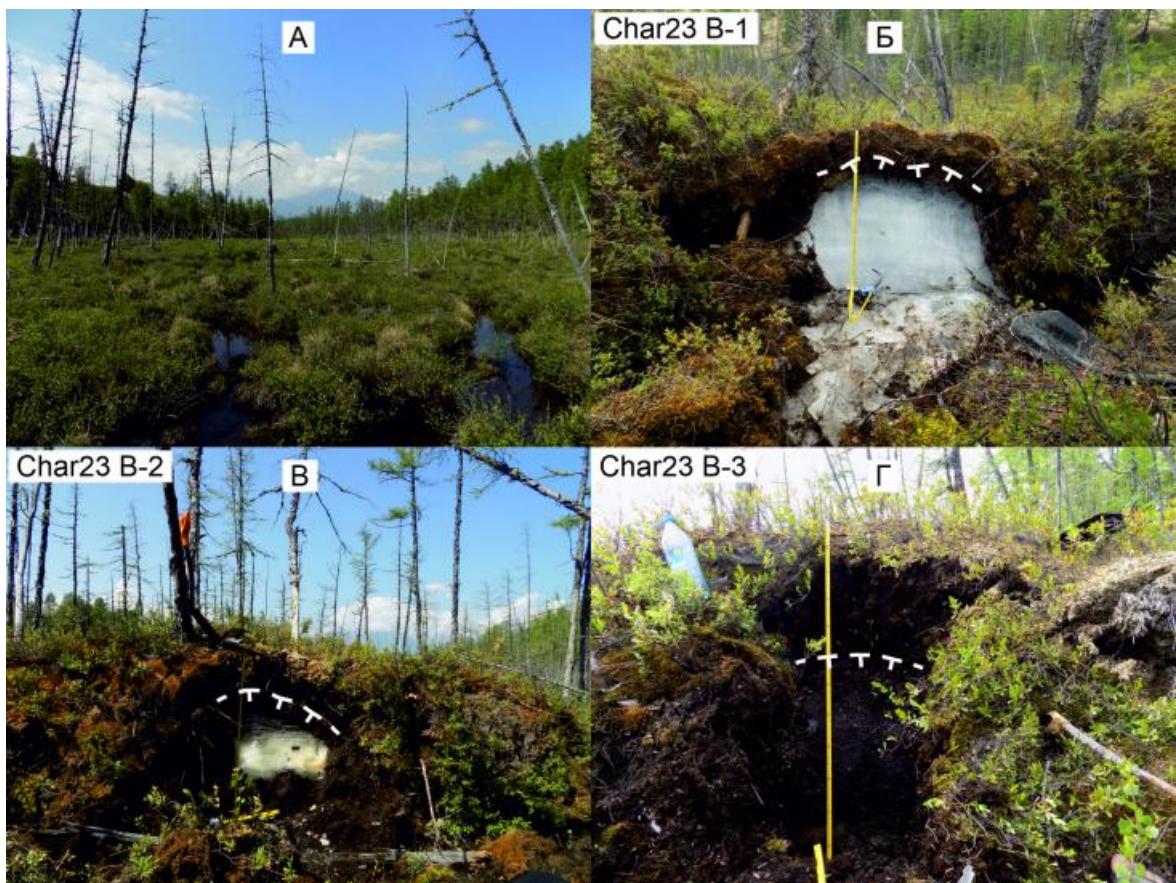


Рис. 9. Объекты исследования: А – заболоченное понижение термосуффозионной воронки в Северо-Западной части Чарских песков; Б, В, Г – бугры пучения Char23 В-1, Char23 В-2 и Char23 В-3. Пунктиром с засечками обозначена верхняя граница ММП в профилях бугров, засечки направлены в сторону ММП. Фото В.А. Паламарчук

Верхняя часть разрезов, заложенных на буграх, вскрывает современную растительность мохово-сфагнового ботанического состава, иногда пронизанную живыми корнями и содержащую остатки древесной растительности. Ниже залегает более разложенный торф тёмно-бурого цвета и аналогичного растительного состава, непосредственно под СТС этот торф мёрзлый, чаще всего имеет массивную криотекстуру, низкую и среднюю льдистость. Ледяные ядра бугров пучения состоят в основном из прозрачного и полупрозрачного белого льда с выраженной вертикальной или горизонтальной слоистостью. Изредка такие слои сменяются менее мощными серыми непрозрачными слоями льда, содержащими небольшое количество грунтовых частиц. В разрезе бугра Ch-23-2 под слоями льда был встречен ещё один слой торфа высокой визуально оценённой льдистости и порфировой криотекстуры. В разрезе бугра Ch-23-3 под слоями мёрзлого торфа был обнаружен слой талого серого влагонасыщенного песка, который был в значительной степени прокрашен тонкодисперсными частицами органического вещества (рис. 10).

Послойные описания строения исследованных бугров

1. Бугор Ch-23-1

Высота опробованной части: 80 см; Мощность торфа: 0–20 см; Мощность СТС: 15 см.

- Слой 1: Современный сфагново-моховый покров, 0–5 см; рыхлый, практически сухой, рыжевато-бурый.
- Слой 2: Торф талый сфагново-моховый с фрагментами древесной растительности, 5–15 см.

см; средней степени разложения, рыхлый, свежий, тёмно-бурый.

- *Слой 3:* Торф мёрзлый сфагново-моховый с фрагментами древесной растительности, 15-20 см; средней степени разложения, средней льдистости, массивной криотекстуры, тёмно-бурый к чёрному.
- *Слой 4:* Лёд серый, 20 – 28 см; непрозрачный, с большим количеством пузырьков воздуха, непрочный.
- *Слой 5:* Лёд белый, 28 – 70 см; полупрозрачный, вертикально-слоистый, без явных включений, повышенной прочности.
- *Слой 6:* Лёд серый, 70 – 80 см; непрозрачный, с большим количеством пузырьков воздуха, непрочный, с редкими включениями минерального грунта.

2. Бугор Ch-23-2

Высота опробованной части: 90 см; Мощность торфа: 0 – 35 и 70 – 90 см; Мощность СТС: 30 см.

- *Слой 1:* Современный сфагново-моховый покров с фрагментами древесной растительности, 0-8 см; рыхлый, практически сухой, рыжевато-бурый.
- *Слой 2:* Торф талый сфагново-моховый с фрагментами древесной растительности, 8-27 см; средней степени разложения, рыхлый, свежий, тёмно-бурый.
- *Слой 3:* Торф мёрзлый сфагново-моховый с фрагментами древесной растительности, 27-35 см; средней степени разложения, средней льдистости, массивной криотекстуры, тёмно-бурый к чёрному.
- *Слой 4:* Лёд горизонтально-слоистый, 35-54 см; прослои прозрачные и серые непрозрачные, с малым количеством пузырьков воздуха.
- *Слой 5:* Лёд белый, 54-70 см; прозрачный, без признаков слоистости, без явных включений, повышенной прочности.
- *Слой 6:* Торф мёрзлый сфагново-моховый с фрагментами древесной растительности, 70-82 см; средней степени разложения, высокой льдистости, порфировой криотекстуры, тёмно-бурый к чёрному.
- *Слой 7:* Торф мёрзлый сфагново-моховый с фрагментами древесной растительности, 82-90 см; высокой степени разложения, средней льдистости, массивной криотекстуры, тёмно-бурый к чёрному.

3. Бугор Ch-23-2

Высота опробованной части: 120 см; Мощность торфа: 0 - 120 см; Мощность СТС: 50 см.

- *Слой 1:* Современный сфагново-моховый покров с фрагментами древесной растительности, 0-15 см; рыхлый, практически сухой, рыжевато-бурый.
- *Слой 2:* Торф талый сфагново-моховый с фрагментами древесной растительности, 15-50 см; средней степени разложения, рыхлый, свежий, тёмно-бурый.
- *Слой 3:* Торф мёрзлый сфагново-моховый с фрагментами древесной растительности, 50-100 см; средней степени разложения, средней льдистости, массивной криотекстуры, тёмно-бурый к чёрному.

- Слой 4: Песок талый, влагонасыщенный, 100-120 см; серый, заторфованный, рыхлый.

Отобранные образцы. Всего в ходе полевых исследований в 2023 г. из исследованных бугров пучения были отобраны 23 образца льда из ледяных ядер (рис. 11, табл. 1) и 24 образца торфа, в т.ч. 2 из них – для проведения радиоуглеродного анализа (см. рис. 10).

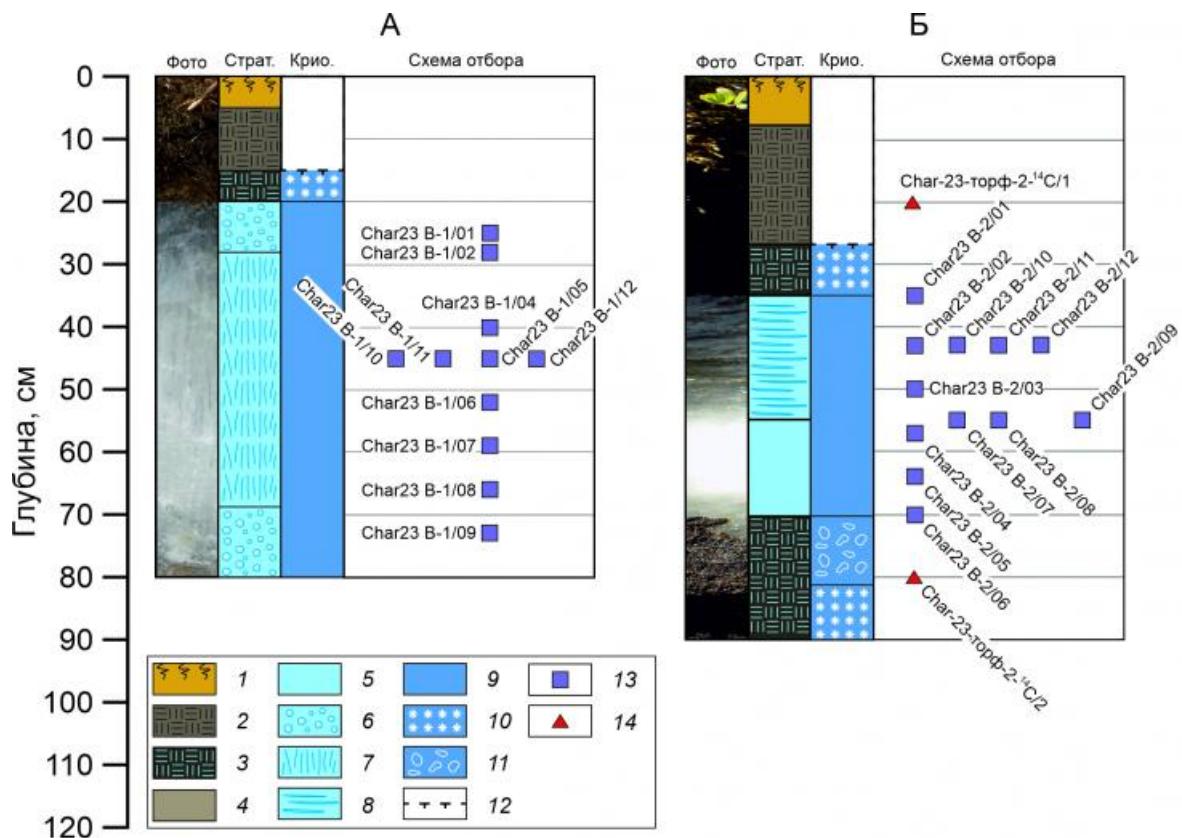


Рис. 10. Литолого-стратиграфические и криолитологические строения профилей исследованных бугров пучения: А – Ch-23-1, Б – Ch-23-2, В – Ch-23-3. 1 – современный растительный покров; 2 – талый торф; 3 – мёрзлый торф; 4 – талый песок; 5 – лёд прозрачный; 6 – лёд пузырчатый; 7 – лёд вертикально-слоистый; 8 – лёд горизонтально-слоистый; 9 – лёд; 10 – массивная криотекстура; 11 – порфировая криотекстура; 12 – граница ММП (штрихи направлены в сторону мёрзлой толщи); 13 – точки отбора проб на определение значений $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$; 14 – точки отбора проб торфа на радиоуглеродный анализ (^{14}C)

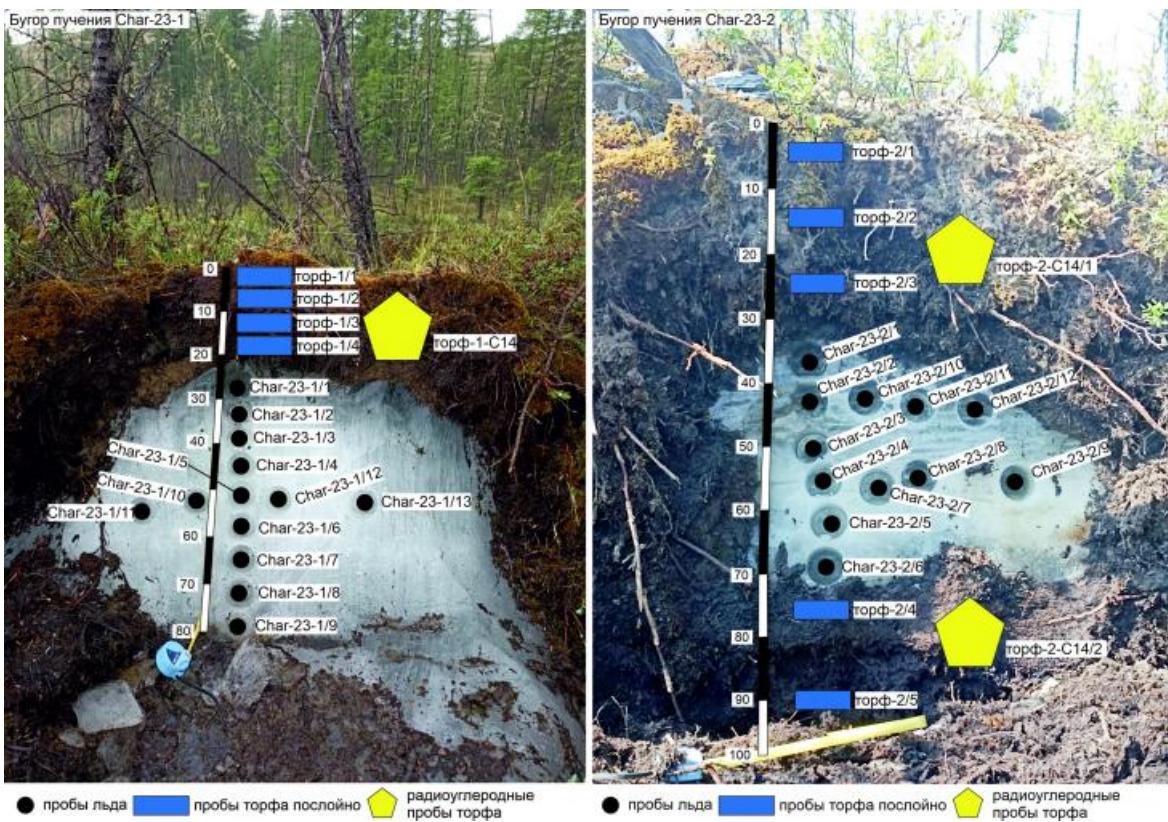


Рис. 11. Отбор образцов из бугров пучения: а – Ch-23-1, б – Ch-23-2. Фото А.Гинзбурга

Методы исследования

Отбор образцов торфа и льда проводился из зачищенных разрезов в центрах бугров. Торф отбирали металлическим ножом, масса каждого образца составляла 100–150 г. Торф в пластиковых пакетах с герметичной застёжкой zip-lock перевозился в лабораторию, где при комнатной температуре высушивался и измельчался. Образцы льда отбирали, выскривая из обнажения ледяной стенки металлической коронкой с алмазным напылением при помощи электродрели Bosch GSR 36V LI-ion (Германия). Образцы льда оттаивали при комнатной температуре и переливались в пластиковые фляконы, герметизировались и перевозились в лабораторию.

Лабораторные изотопные исследования льда из ядра сезонных бугров пучения

Измерения изотопного состава кислорода и водорода льда выполнены на лазерном инфракрасном спектрометре Picarro L 2130-i в Ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета. Использованы следующие международные стандарты: V-SMOW-2, GISP, SLAP, USGS-45 и USGS-46. Погрешность определений составила: для ^{18}O – $\pm 0,02\text{ ‰}$, для $\delta^2\text{H}$ – $\pm 0,3\text{ ‰}$. Значения дейтериевого эксцесса (d_{exc}) были рассчитаны по формуле В.Дансгора [30]: $d_{\text{exc}} = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$.

Всего проанализировано 23 пробы льда из ядер сезонных бугров пучения (см. табл. 1).

Таблица 1. Ведомость проб для определения изотопного состава сезонных бугров пучения в Чаре

Номер образца	Глубина, м	Номер образца	Глубина, м
Сезонный бугор Чара 1 (Char23)		Сезонный бугор Чара 2 (Char23 B-)	

B-1)		2)	
Char23 B-1/01	0-5	Char23 B-2/01	0-5
Char23 B-1/02	5-8	Char23 B-2/02	5-11
Char23 B-1/04	17-22	Char23 B-2/03	11-16
Char23 B-1/05	22-29	Char23 B-2/04	16-21
Char23 B-1/06	29-35	Char23 B-2/05	23-28
Char23 B-1/07	35-42	Char23 B-2/06	29-35
Char23 B-1/08	42-50	Char23 B-2/08	16-21
Char23 B-1/09	50-55	Char23 B-2/09	16-21
Char23 B-1/10	22-29	Char23 B-2/10	5-11
Char23 B-1/11	22-29	Char23 B-2/11	5-11
Char23 B-1/12	22-29	Char23 B-2/12	5-11
		Char23 B-2/13	5-11

Определение радиоуглеродного возраста производилось методом жидкостной сцинтилляции в лаборатории Геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана, СПбГУ.

Результаты

Радиоуглеродный возраст торфа перекрывающего ледяное ядро сезонных бугров пучения. Полученные данные по абсолютному возрасту торфа сезонных бугров в Чаре указывают на современное накопление торфа (табл. 1).

Таблица 2. Результаты определения радиоуглеродным методом абсолютного возраста образцов из торфа сезонных бугров в Чаре

Лаб.	Полевой номер образцов, материал датирования, Радиоуглеродный возраст,	номер	глубина	лет	
LU-11281 № 1. Char-23-торф-2- ^{14}C /1, глуб. 0,35 м.				$\text{pmc} = 1.262 \pm 0.011$	
				современный	
LU-11282 № 2. Char-23-торф-2- ^{14}C /2, глуб. 0,8 м.				$\text{pmc} = 1.221 \pm 0.009$	
				современный	

Изотопный состав ледяного ядра сезонных бугров пучения. Изотопный состав ледяного ядра сезонных бугров пучения 1 и 2 заметно варьирует несколько по-разному (табл. 3 и 4): в бугре пучения 1 значения $\delta^{18}\text{O}$ изменяются от $-16,59$ до $-19,06\text{\textperthousand}$ (средняя величина $\delta^{18}\text{O} = -17,60\text{\textperthousand}$), величины $\delta^2\text{H}$ варьируют от $-129,3$ до $-144\text{\textperthousand}$ (средняя величина $\delta^2\text{H} = -135\text{\textperthousand}$); в бугре пучения 2 значения $\delta^{18}\text{O}$ изменяются от $-15,39$ до $-19,25\text{\textperthousand}$ (средняя величина $\delta^{18}\text{O} = -17,48\text{\textperthousand}$), величины $\delta^2\text{H}$ варьируют от $-122,6$ до $-145,5\text{\textperthousand}$ (средняя величина $\delta^2\text{H} = -134,7\text{\textperthousand}$).

Таблица 3. Изотопный состав льда сезонных бугров пучения в Чарской котловине, июль 2023 г.

Номер образца	Гл., см	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	d_{exc}	Номер образца	Гл., см	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	d_{exc}
Сезонный бугор Чара 1 (Char23 B-1)					Сезонный бугор Чара 2 (Char23 B-2)				

Сезонные бугры Чарской котловины					Сезонные бугры Чарской котловины				
Char23	B-	0-5	-	1,9	Char23	B-	0-5	-	3,4
1/01			16,59	130,8		2/01		-16,65	-129,8
Char23	B-	5-8	-	4,4	Char23	B-	5-11	-	4,4
1/02			16,71	129,3		2/02		-17,00	-131,6
Char23	B-	17-	-	5,3	Char23	B-	11-16	-	4,5
1/04		22	17,08	131,3	2/03			-17,48	-135,3
Char23	B-	22-	-	5,9	Char23	B-	16-21	-	6,5
1/05		29	17,36	133,0	2/04			-18,22	-139,3
Char23	B-	29-	-	6,5	Char23	B-	23-28	-	6,0
1/06		35	17,82	136,1	2/05			-18,13	-139,0
Char23	B-	35-	-	6,9	Char23	B-	29-35	-	0,5
1/07		42	18,18	138,5	2/06			-15,39	-122,6
Char23	B-	42-	-	8,5	Char23	B-	16-21	-	7,2
1/08		50	18,75	141,5	2/08			-18,29	-139,1
Char23	B-	50-	-	8,5	Char23	B-	16-21	-	8,5
1/09		55	19,06	144,0	2/09			-19,25	-145,5
Char23	B-	22-	-	5,1	Char23	B-	5-11	-	4,3
1/10		29	17,32	133,5	2/10			-17,18	-133,1
Char23	B-	22-	-	5,8	Char23	B-	5-11	-	5,1
1/11		29	17,26	132,3	2/11			-17,32	-133,5
Char23	B-	22-	-	5,1	Char23	B-	5-11	-	5,0
1/12		29	17,51	135,0	2/12			-17,43	-134,4
					Char23	B-	5-11	-	4,6
					2/13			-17,38	-133,4

Таблица 4. Минимальные, средние и максимальные значения $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and d_{exc} льда сезонных бугров пучения в Чарской котловине

Номер бугра	Номер точки	Кол. обр	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)			$\delta^2\text{H}$ (‰)			d_{exc} (‰)		
			мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.
Сезонный бугор Чара 1	Char23 B-1	11	- 19,06	- 17,60	- 16,59	-144	-135	- 129,3	1,9	5,8	8,5
Сезонный бугор Чара 2	Char23 B-2	12	- 19,25	- 17,48	- 15,39	- 145,5	- 134,7	- 122,6	3,4	5,0	8,5

Если сравнивать изотопный состав льда ядра сезонных бугров пучения, например с летней водой рек Чара (значение $\delta^{18}\text{O}$ равно $-18,28\text{‰}$, величина $\delta^2\text{H} = -139,5\text{‰}$), Нерюнгри (значение $\delta^{18}\text{O}$ равно $-20,9\text{‰}$, величина $\delta^2\text{H} = -162\text{‰}$) или Беркакит (значение $\delta^{18}\text{O}$ равно $-17,8\text{‰}$, величина $\delta^2\text{H} = -135,6\text{‰}$)^[31-34], то лед льда ядра сезонных бугров в целом изотопически близок к изотопному составу речных вод летом, но наиболее изотопно-тяжелый лед бугров закономерно изотопно-тяжелее речных вод, вследствие фракционирования при переходе первых порций вод сезонно-талого слоя в лед.

Дискуссия

Изученность льда сезонных бугров пучения

Сезонные инъекционные, инъекционно-сегрегационные и сегрегационные бугры пучения довольно широко распространены в области островного, прерывистого и сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Их образование может происходить каждую зиму на участках разгрузки подземных вод или при замерзании вод сезонно-талого слоя.[\[35-37\]](#) Процесс формирования инъекционного бугра часто бывает двухступенчатым. На первой стадии поверхность активно выпучивается вследствие того, что гидростатическое давление вод в деятельном слое превышает давление вышележащего слоя пород. В течение второй стадии рост происходит гораздо медленнее, по мере того как вода в ядре бугра постепенно вымерзает.

Р. ван Эвердингеном описано формирование сезонных бугров пучения в искусственно создаваемых массивах промерзающих грунтов, например, вблизи Трансаляскинского нефтепровода, вдоль насыпи дорожного полотна шоссе Демпстер, Северо-Западные территории, Канада, вдоль участка трассы на Аляске, в результате неправильной эксплуатации артезианской скважины в районе г.Фербенкса.[\[38\]](#)

Сезонные бугры, исследованные Р.ван Эвердингеном в Медвежьих Скалах, имели овальную форму и размеры от 20 м по короткой оси до 65 м по длинной оси, высота их варьировала от 2,5 до 5 м.[\[38\]](#) Формирование бугров начинается в конце декабря, причем на ранних стадиях скорость их роста может достигать 0,55 м/день, что намного превышает скорость обычного морозного пучения. Разрушение бугров происходит в конце апреля – начале мая и сопровождается просадками поверхности, иногда довольно стремительными: до 1,35 м в течение нескольких дней. Некоторые небольшие фрагменты сезонных бугров сохранялись до середины сентября.

Внутреннее строение типичного сезонного бугра пучения в Медвежьих Скалах следующее (сверху-вниз): слой мёрзлого грунта, например торфа, мощностью от 20 до 85 см, нижние 10-15 см которого в некоторых случаях содержат линзы сегрегационного льда, подстилается слоем чистого льда мощностью от 25 до 85 см. Под слоем льда часто встречаются пустоты, максимальная высота которых составляет 1,1 м. На внутренней поверхности пустот видны отметки горизонтального уровня воды, указывающие на то, что в процессе формирования бугров пучения пустоты, скорее всего, наполнялись водой. Р. ван Эвердингеном было показано, что нет корреляции между среднезимними температурами, высотой снежного покрова и количеством, положением или размерами образующихся сезонных бугров пучения. Установлено, что бугры могут формироваться в грунтах с широкими вариациями гранулометрического состава.[\[38,39\]](#)

К.Хинкель с соавторами[\[40\]](#) описали группу сезонных бугров пучения с ледяными ядрами, образовавшихся зимой 1995–1996 годов недалеко от Барроу, Аляска, в осущенном бассейне термокарстового озера. В середине августа 1996 г. ими было обнаружено более 20 бугров диаметром от 5 до 20 м. Керны льда, полученные из центра и края одного из бугров, указывают на боковую подземную инъекцию воды во время замерзания сезонно-талого слоя.

М.Ю.Голубчиков с соавторами[\[41\]](#) описали формирование и распад сезонного инъекционного бугра пучения сформировавшегося в толще подруслового талика близ г.Норильска. Техногенный бугор пучения сформировался в полости подруслового талика в результате выброса большого количества воды при аварии на водопроводе 18 мая 2004 г. Утечка была ликвидирована в течение одних суток, но значительное количество воды, вероятно, успело профильтироваться в подрусловой талик протекающего на этом месте ручья. Бугор пучения сформировался примерно в 200 м ниже по склону от

трубопровода. Между трубопроводом и гидролакколитом на поверхности снежника образовалась наледь, фиксирующая, видимо, место фильтрации воды в подрусловой талик. Размер наледи на момент первых наблюдений (17 июня 2004 г) составлял около 10 м в диаметре.

На момент первого наблюдения в высоту бугор пучения составлял около 4 м, и имел вытянутую, округлую форму, его продольные размеры составляли около 60 м, а поперечные около 28 м (рис. 12). Лед, вскрывавшийся в ядре бугра, был голубой и прозрачный, а в центре он сменялся белым, послойно-намороженным, образовавшимся, видимо, вследствие растрескивания ледяного ядра и замерзания в трещине талых вод. Ширина этого повторно-намороженного льда составляла около 60 см., а длина - около 11 м. Белый лед, заполнявший трещины в прозрачном ледяном ядре, состоял из кристаллов, имеющих примерно 5 см в длину и направленных перпендикулярно стенкам трещины (рис. 13). К 7 июля бугор сильно деградировал.



Рис. 12. Сезонный инъекционный бугор пучения техногенного происхождения, сформировавший в толще подруслового талика близ г.Норильска. Фото Е. Перминовой



Рис. 13. Ледяное ядро (а) и структура льда (б) сезонного инъекционного бугра пучения техногенного происхождения близ г.Норильска. Фото Е. Перминовой

Лёд в центре трещины протаял, и с левой стороны образовался грот, высотой около 130 см., и глубиной около 3 м. м. Последнее наблюдение за состоянием гидролакколита было произведено 22 июля. Жаркие погодные условия лета 2004 г привели к полному разрушению гидролакколита. Бугор пучения практически сравнялся с землей, а в центре его образовалась депрессия, глубиной около 1 м. [41]

Особо опасны сезонные бугры для эксплуатации линейных сооружений: трубопроводов, железных и автомобильных дорог, аэродромов. С.Е.Гречищев и Ю.Б.Шешин [42] описали два случая, когда возникло значительное морозное пучение песчаных подсыпок под взлётно-посадочной полосой.

На аэродроме, расположенном на территории криолитозоны в пос. Амдерма в процессе промерзания создавалась ситуация, когда на относительно сухих участках происходило смыкание промерзшего слоя с подстилающими многолетнемерзлыми породами, а на обводненной части промерзание запаздывало и образовался гидравлически замкнутый объем водонасыщенного грунта мощностью 0,3-0,5 м. В дальнейшем он промерз и в момент, когда глубина промерзания достигла уровня грунтовых вод, возникал дополнительный напор приводивший к самоизливу воды на поверхность. Здесь образовались шлиры льда и наледные бугры, что вызвало пучение массива (рис. 14).

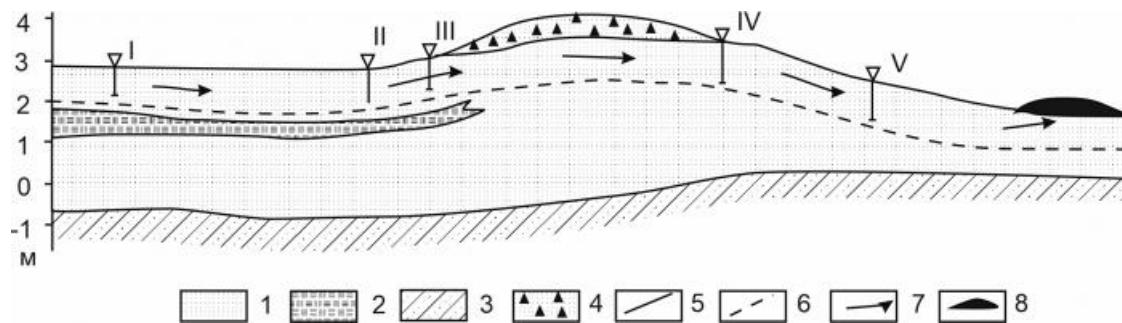


Рис. 14. Развитие деформаций взлётно-посадочной полосы на восточном участке аэродрома пос. Амдерма, вследствие сегрегационного и сегрегационно-инъекционного льдообразования, приведшего к пучению (по С.Е.Гречищеву, Ю.Б.Шешину [42]):

1 – песок; 2 – переслаивание торфа и песка; 3 – переслаивание темноцветных супесей;

суглинков, песка (илы); 4 – подсыпка из щебня; 5 – асфальтобетонное покрытие ВПП; 6 – граница СТС; 7 – направление движения вод СТС в процессе промерзания; 8 – наледные бугры; I-V – номера скважин

На территории другого аэродрома, расположенного в зоне глубокого сезонного промерзания (т. е. без многолетнемерзлых пород), песчаная подсыпка под взлётно-посадочной полосой мощностью 0,5-1,2 м была уложена на плотные глины.

Подсыпка была полностью обводнена из-за неисправностей дренажной системы. Глубина промерзания составляет около 1,2 м. Поверхность глин под песчаной подсыпкой неровная, и на расстоянии 300 м мощность подсыпки плавно меняется от 1 до 0,4 м. При ее промерзании до глубины 0,4-0,5 м в песке создался гидравлически замкнутый объем, ограниченный водонепроницаемыми стенками: сверху промерзшим слоем песка, с боков и снизу глиной. Мощность этого замкнутого объема около 0,4-0,5 м. В дальнейшем он промерз, так как целиком находился в пределах сезонномерзлого слоя. При промерзании образовавшихся замкнутых объемов возникало поровое давление, приводившее к изгибу промерзшего слоя песка.

Даже при одномерном промерзании водонасыщенных песков или гравийно-галечниковых грунтов воды сезонноталого слоя становятся напорными, приобретая дополнительный напор, что обеспечивает возможность их самоизлива на поверхность, если имеются условия для дренирования. В частности, такой дреной может являться, отапливаемое здание с теплым полом первого этажа (т. е. здание, построенное без проветриваемых подпольй). Так, в 60-х годах в ноябре-декабре постоянно заливался грунтовыми водами земляной пол теплого ангара Якутского аэропорта.

П. Морзе и К. Бёрн^[43] исследовали невысокие сезонные бугры на поверхности валиковых вогнутых полигонов на равнине Биг-Лейк-Дельта, во внешней части дельты р. Маккензи. В 2008 и 2009 гг. было выполнено бурение 12 сезонных бугров пучения с целью описания их морфологических разновидностей и изучения процессов их роста. Сезонные бугры пучения, содержащие ледяное ядро мощностью от 15 до 58 см, имели высоту менее 1 м и диаметр от 3 до 8 м; некоторые бугры имели длину более 10 м. Органические включения во льду, плотность пузырьков, профили электропроводности и структура кристаллов льда указывали на то, что бугры возникли в результате гидростатического напора.

М.Пакетт с соавторами^[44] выполнили криостратиграфические исследования формирования подземного льда и сезонных бугров пучения в арктической полярной пустыне близ Резольют-Бэй, Нунавут.

С.Понти с коллегами^[45] рассмотрели пространственно-временную изменчивость ледяных бугров вдоль Антарктического побережья в Боулдер-Клей (север Земли Виктории). Они сравнили по снимкам два сезонных бугра пучения и зафиксировали их противоположные тенденции. Первый сезонный бугор с ледяным ядром был выше в прошлом (1996–2004 гг.), чем в последнее время (2014–2019 гг.), тогда как второй сезонный бугор с ледяным ядром продемонстрировал противоположную тенденцию.

Вариации изотопного состава льда сезонных бугров пучения

Изотопный состав льда российских сезонных бугров пучения изучен в немногих точках. Ранее в сезонных буграх пучения (рис. 15) в долине р. Чары Ю.Васильчук с соавторами^[31] опубликовали результаты двух определений изотопного состава льда из

ядра сезонного бугра пучения: с глубины 0,5 м значение $\delta^{18}\text{O}$ $-15,1\text{\textperthousand}$, величина $\delta^2\text{H}$ $-124.4\text{\textperthousand}$, и $d_{\text{exc}} = -3.9\text{\textperthousand}$; с глубины 0,4 м значение $\delta^{18}\text{O}$ $-15,4\text{\textperthousand}$, величина $\delta^2\text{H}$ $-123,7\text{\textperthousand}$, и $d_{\text{exc}} = -0,6\text{\textperthousand}$.



Рис. 15. Сезонный бугор пучения близ Чарских песков: а – трещина на вершине бугра с вскрытым ледяным ядром, б – структура льда (ice core of seasonal frost blister).

Фото и отбор льда Ю.В. Станиловской

Ю.В. Станиловской в 2014 г., во время экскурсии в китайский горный Тибет были опробованы несколько ядер сезонных бугров пучения (рис. 16), их изотопный состав проанализирован в лаборатории стабильных изотопов географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на масс-спектрометре Delta-V Plus с использованием комплекса газ-бенч.



Рис. 16. Лед из сезонных бугров пучения в Тибете. а – на абр. выс. 4325 м, $35^{\circ}2'42''$ с.ш., $97^{\circ}34'47''$ в.д., кристаллы льда высотой 15-25 см, шириной 0,5-1,5 см. Мощность верхнего торфяного слоя 15-25 см, величина $\delta^2\text{H}$ $-53,6\text{\textperthousand}$; Вода из ручья рядом, значение $\delta^2\text{H}$ $-53,6\text{\textperthousand}$, Вода из реки рядом, значение $\delta^2\text{H}$ $-51,4\text{\textperthousand}$; б – лед из трещин маленьких бугров на абр. выс. 4601 м, $34^{\circ}6'54.79''$ с.ш., $97^{\circ}38'58.61''$ в.д., величина $\delta^2\text{H}$ $-60,1\text{\textperthousand}$, вода из термокарстового озера рядом значение $\delta^2\text{H}$ $-54,7\text{\textperthousand}$.

Фото и отбор льда Ю.В. Станиловской

А.К.Васильчук и Ю.К.Васильчук получили изотопные данные по льду сезонных бугров пучения, исследованных в августе 1991 г. на Чукотке, на п-ове Дауркина, в районе оз.Коолень ($66^{\circ}05'$ с.ш., $170^{\circ}30'$ з.д.) в 40-45 км западнее Уэлена и примерно на 80 км южнее, на р.Чульхевеем близ пос. Лаврентия ($65^{\circ}36'$ с.ш., $170^{\circ}30'$ з.д.), формирующихся в условиях сурового морского климата. Высота этих бугров составляет 1-1,5 м, ледяное ядро залегает на глубине 0,4 м, его мощность – около 1 м (рис. 17).

По льду сезонного бугра в районе оз.Коолень получены следующие значения $\delta^{18}\text{O}$: на глубине 0,4 м – $-13,4\text{\textperthousand}$, на глубине 0,8 м – $-15,3\text{\textperthousand}$. По льду сезонного бугра в районе р.Чульхевеем значения $\delta^{18}\text{O}$ составили в среднем $-13\text{\textperthousand}$ на глубине 0,4 м, $-15,2\text{\textperthousand}$ на глубине 0,8 м, $-10\text{\textperthousand}$ на глубине 1 м и около $-11\text{\textperthousand}$ на глубине 1,6 м (см. рис. 17).

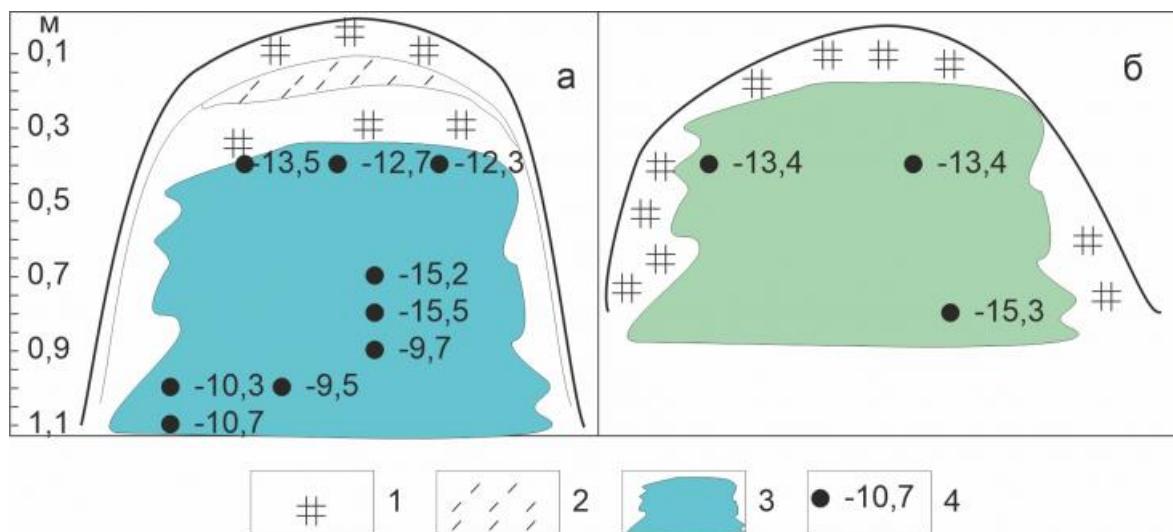


Рис. 17. Строение и изотопно-кислородный состав сезонных инъекционных бугров пучения на пойме р.Чульхевеем, близ пос. Лаврентия (а) и на пойме оз.Коолень (б) на п-ове Дауркина на востоке Чукотки, примерно в 50 км западнее пос. Уэлен (по данным Ю.К.Васильчука^[34]): 1 – торф; 2 – супесь; 3 – инъекционный лед; 4 – значения $\delta^{18}\text{O}$ во льду

Как видно, значения $\delta^{18}\text{O}$ в верхней части ледяного ядра обоих бугров пучения, расположенных в разных районах Чукотки, оказались очень близкими (рис. 18). Это отражает близкий изотопный состав атмосферных осадков и подземных вод, питающих рассмотренные бугры пучения на Чукотке.

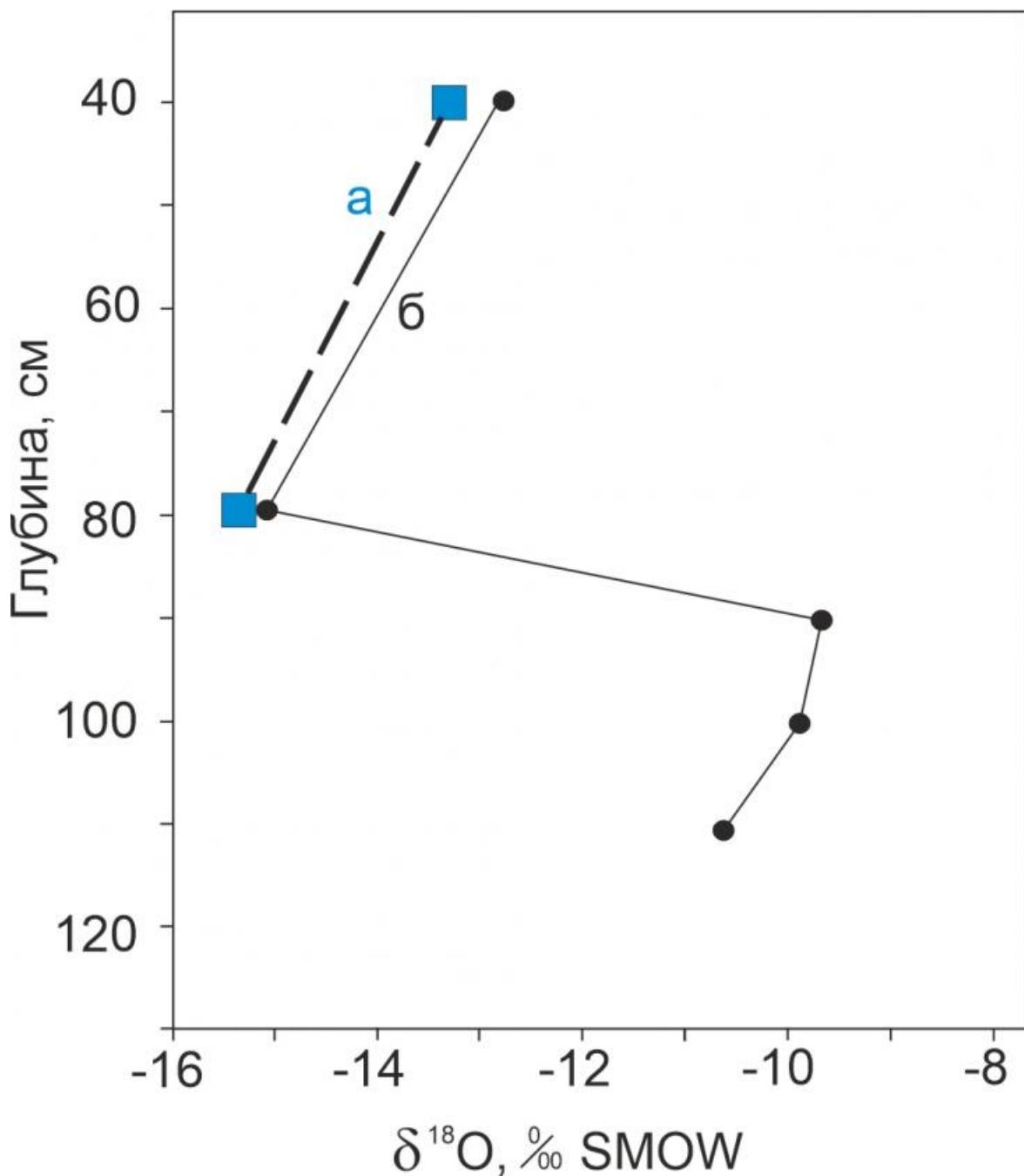


Рис. 18. Распределение значений $\delta^{18}\text{O}$ по глубине во льду сезонных инъекционных бугров пучения, исследованных на Чукотке (по данным Ю.К.Васильчука^[34]): а - в районе оз.Коолень, б - в районе р.Чульхевеем

Резкий сдвиг изотопной кривой, отмеченный во льду сезонных бугров пучения Чукотки, возможно, свидетельствует о перерыве в льдообразовании и возможно возобновившемся формировании льда в течение одного цикла промерзания.

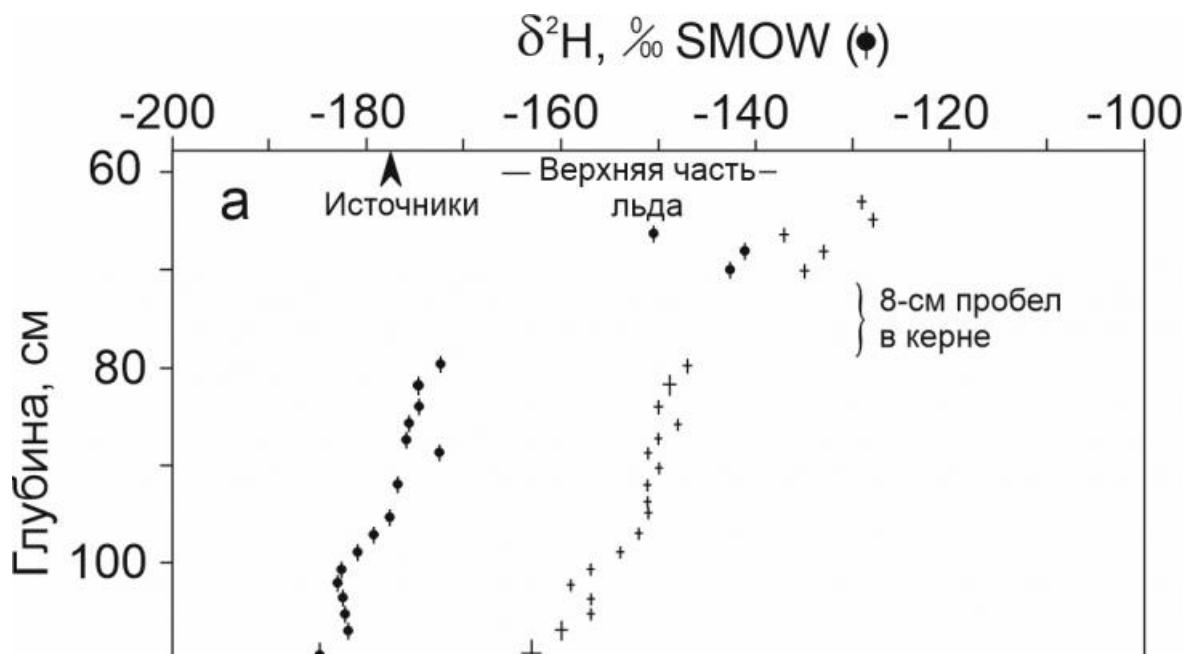
Распределение значений $\delta^{18}\text{O}$ по глубине во льду сезонных инъекционных бугров пучения, исследованных на Чукотке указывают, что образцы с наименее отрицательными изотопными значениями (располагающиеся в нижней части ледяной линзы - см. рис. 20) соответствуют первым порциям замерзшей воды, а с наиболее отрицательными изотопными значениями соответствуют последней порции воды из сезонно-талого слоя перед ее полным промерзанием. Можно предположить, что большая часть этого льда образовалась путем промерзания снизу-вверх.

Более детальные исследования изотопного состава сезонных бугров пучения выполнены на севере Канады, [38,39,46,47] в Монголии. [48] На Аляске сезонные бугры пучения встречены в долине р.Карибу, где они формируются на одной территории с многолетними инъекционными буграми пучения (булгунняхами). Подобное совместное распространение сезонных и многолетних инъекционных бугров пучения отмечено и в Канаде, в районе р.Беар, а также на Шпицбергене в довольно суровых мерзлотных условиях при среднегодовой температуре многолетнемерзлых пород $-5,2^{\circ}\text{C}$ и их мощности от 3 до 100 м. [49].

Определение содержания стабильных изотопов при исследовании сезонных бугров пучения – это инструмент для восстановления последовательности их развития, особенно заключительной стадии роста, на которой происходит активное фракционирование изотопов.

Исследования изотопного состава сезонных бугров пучения на севере Канады проводили Р. ван Эвердинген [38] в Медвежьих Скалах, расположенных в крайней юго-восточной части хребта Нормана ($64^{\circ}55'22''$ с.ш., $125^{\circ}39'22''$ з.д.) и Ф.А.Майкл [47] в районе Норз Форк Пасс, Северо-Западные территории ($64^{\circ}35'39''$ с.ш., $138^{\circ}18'34''$ з.д.). Характерной особенностью районов их исследований является прерывистое распространение многолетнемерзлых пород и разгрузка источников подземных вод. Сезонные бугры пучения и наледи, которые нередко перекрывают их, формируются каждую зиму. В районе Норз Форк Пасс в течение периода с 1980 по 1982 гг. было встречено более 65 сезонных бугров пучения.

В сезонных буграх пучения в Медвежьих Скалах проанализировано [38] содержание природных изотоповдейтерия (величины $\delta^2\text{H}$), тяжёлого кислорода (значения $\delta^{18}\text{O}$) и в льду сезонных бугров пучения (рис. 19), подземных водах и атмосферных осадках. Эти исследования продемонстрировали, что с помощью изотопного анализа можно определить, образовались ли слои льда путем промерзания в открытой системе (постоянно поступающей с транзитными водами), в закрытой системе или в условиях периодически просачивающейся воды, а также идентифицировать источник воды, питающей лед. [38,47]



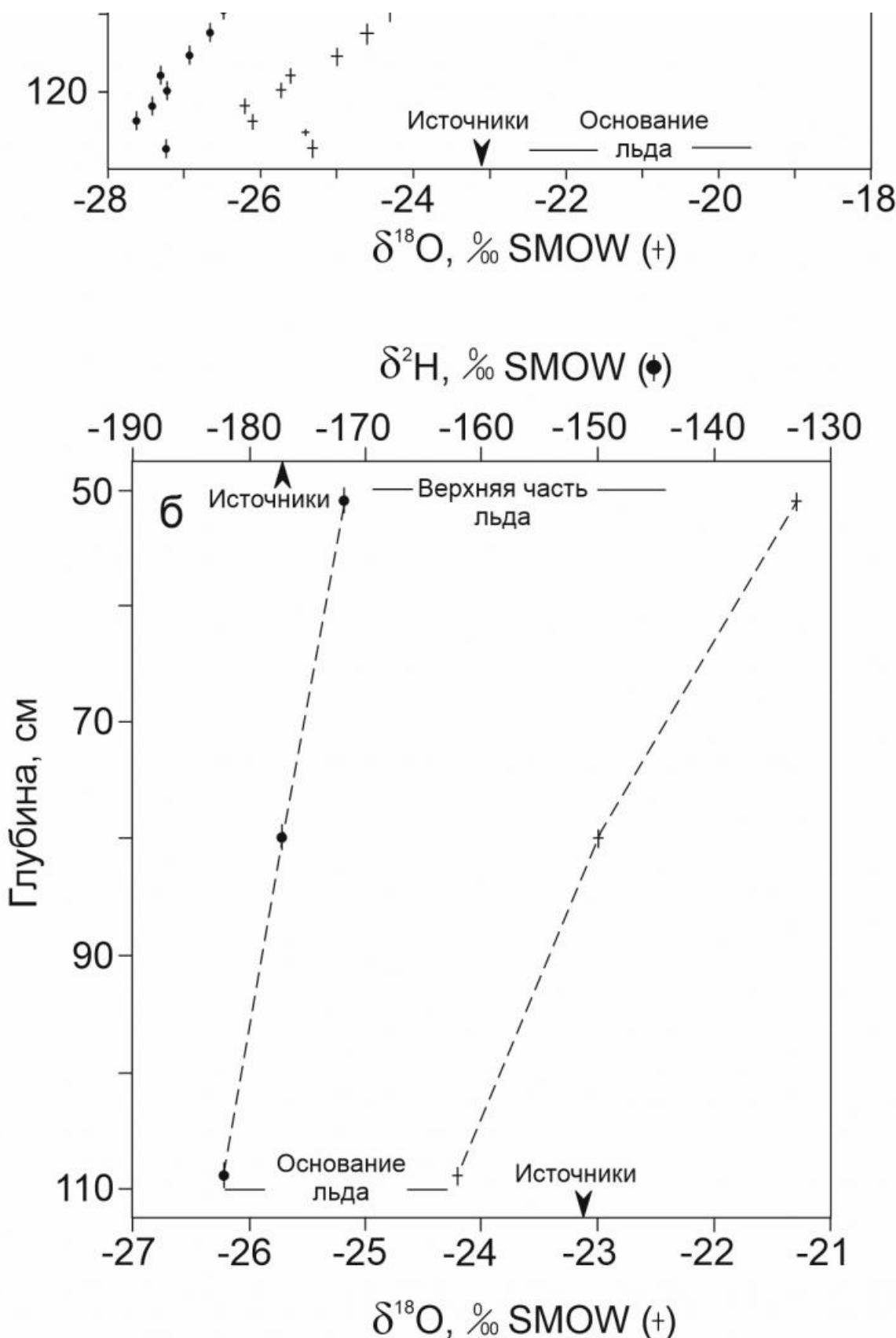


Рис. 19. Распределение значений $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ по глубине во льду сезонных бугров пучения, исследованных в Медвежьих Скалах, Канада. По R.van Everdingen^[38]: а – лед из бугра пучения №1, б – лед из бугра пучения №2

Р. ван Эвердингеном^[38] было установлено, что источником подземных вод являются атмосферные осадки, о чем свидетельствует их близкий изотопный состав. Относительная насыщенность осадков стабильными изотопами кислорода и водорода

изменяется по временам года. Летние осадки обычно обогащены тяжелыми изотопами кислорода и водорода. В подземных же водных системах сезонные изотопные различия сглажены - их изотопный состав близок к среднегодовому составу осадков. Так, в дождевых осадках по метеостанции Норман Уэлс значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют в диапазоне от -20 до $-24,5\text{\textperthousand}$, в снеге - от $-31,5$ до $-31,9\text{\textperthousand}$; в подземных водах - от $-22,4$ до $-23,6\text{\textperthousand}$.

Различия изотопного состава в образцах из различных источников подземных вод, отобранных в одно и то же время, составляют для $\delta^{18}\text{O}$ от $0,7$ до $0,8\text{\textperthousand}$ и для $\delta^2\text{H}$ от $3,1$ до $6,0\text{\textperthousand}$ (см. рис. 19, а), а в образцах из одного источника, отобранных в разное время - до $0,5\text{\textperthousand}$ для $\delta^{18}\text{O}$ и до $2,6\text{\textperthousand}$ для $\delta^2\text{H}$.^[38]

Образцы льда в верхней части льда сезонного бугра пучения №1 в Медвежьих Скалах (см. рис. 19, а) характеризовались менее отрицательными значениями, чем подземные воды, что указывает на положительное фракционирование $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в течение первого периода промерзания вод; облегчение изотопного состава в нижней части льда отражает этап завершения длительного промерзания в сокращающемся резервуаре, который быстро обедняется более тяжелыми изотопами.

Наиболее отрицательные значения, полученные для основания ледяного ядра ($-26,2\text{\textperthousand}$ и $-196,2\text{\textperthousand}$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, соответственно), указывают на то, что значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в воде на заключительной стадии существования остаточного бассейна, возможно, достигли очень низких значений как $-29\text{\textperthousand}$ и $-215\text{\textperthousand}$, соответственно.

Поскольку между мерзлым грунтом и слоем льда в этом бугре не было обнаружено полости, типичной для других бугров пучения, Р.ван Эвердинген^[38] высказал предположение, что лед здесь полностью заполнял пространство между сезонно-мерзлым грунтом и многолетнемерзлыми породами в течение формирования данного бугра.

Подобная изотопная модель была получена и для второго сезонного бугра пучения (см. рис. 19, б). Средневзвешенные значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ для образцов из первого бугра ($-23,3\text{\textperthousand}$ и $-170,3\text{\textperthousand}$) и из второго ($-22,8\text{\textperthousand}$ и $-177,1\text{\textperthousand}$) подобны средним значениям для воды источников ($-23,1\text{\textperthousand}$ и $-177,4\text{\textperthousand}$), подтверждая тот факт, что слои льда сформировались из воды источников. Изотопные данные, таким образом, указывают на то, что лед сезонных бугров пучения образовался из подземных вод в условиях закрытой системы.

Кривые распределения значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ по льду сезонного бугра пучения (рис. 20), построенные Ф.А.Майклом^[47], не демонстрируют каких-либо признаков потери воды в процессе замерзания, т.е. льдистое ядро образовалось в течение единого цикла промерзания почти в идеальных условиях закрытой системы.

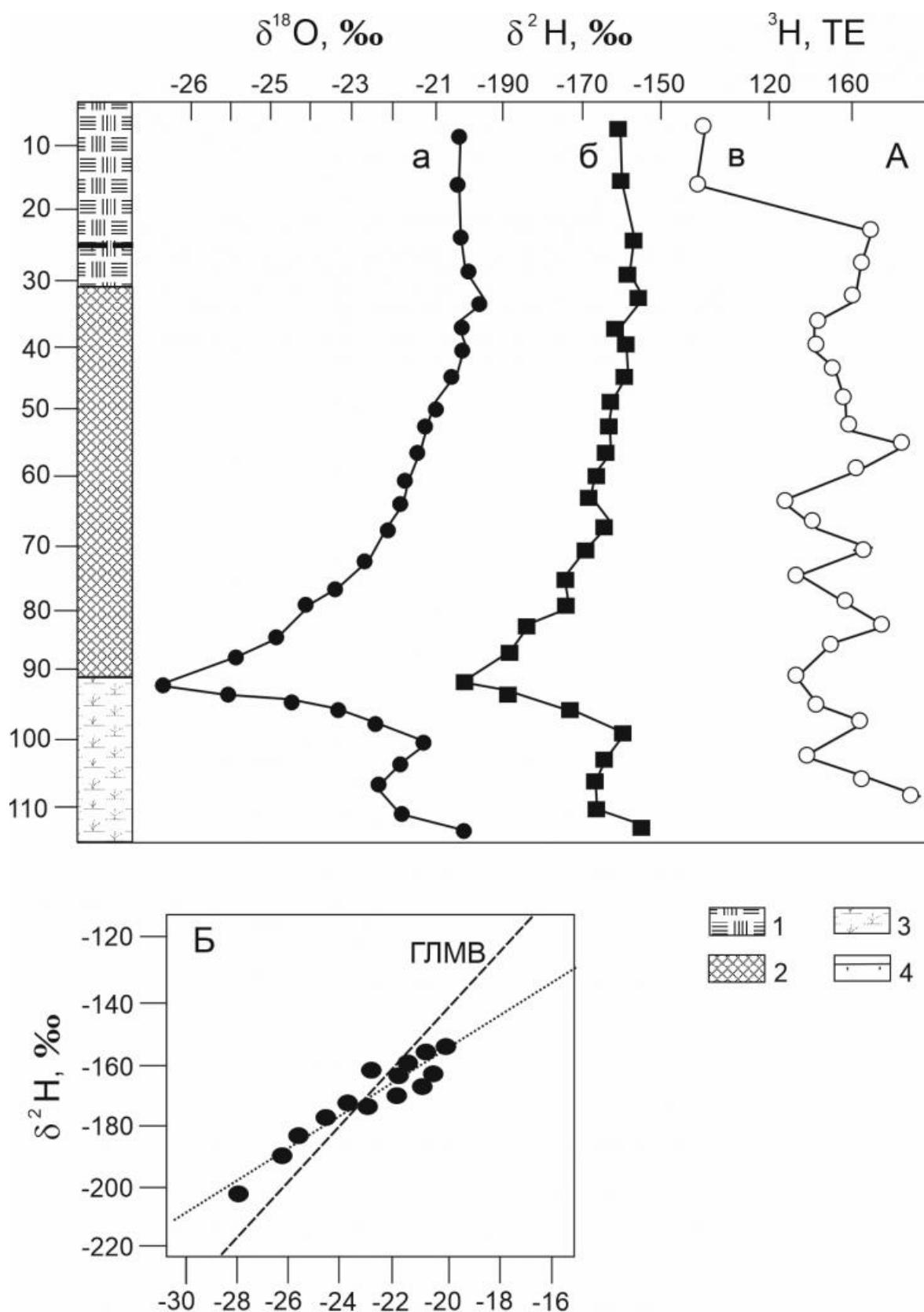


Рис. 20. А. Изотопно-геохимические диаграммы по льду сезонного инъекционно-сегрегационного бугра пучения в районе Норз-Форк Пасс, Юкон, север Канады, в 300 км юго-западнее г.Инувик: кислородная (а), дейтериевая (б) и тритиевая (в). Б. Регрессионные прямые соотношения изотопного атмосферного стандарта Крейга и местных вод из подземных источников и снежного покрова (по F.Michel [47]): 1 – торф; 2 – лед; 3 – торф с грунтом; 4 – подошва сезонно-талого слоя

При этом изотопное фракционирование происходило в неравновесных условиях. Об этом

свидетельствует дейтериевая кривая со значением коэффициента фракционирования $a=1,0130$, т.е. значительно меньшим, чем константа равновесного фракционирования ^2H при этих температурных условиях (1,0206). Хотя значения $\delta^{18}\text{O}$ приближаются к кривой равновесия ($a = 1,0028$), что должно свидетельствовать о том, что фракционирование изотопов кислорода в закрытой системе происходило в условиях равновесия или близких к ним. Различное фракционирование ^{18}O и ^2H в процессе промерзания, скорее всего, является следствием неравновесности процесса промерзания и льдообразования.

Весь лед содержит крупные, вертикальные столбообразные кристаллы льда, указывающие на горизонтальное положение фронта промерзания. Очевидно, ледяное ядро формировалось путем промерзания сверху-вниз, в результате одного единого цикла длительного промерзания без потери воды.

График на рис. 20, Б, построенный по значениям $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ сезонного бугра пучения, сформировавшегося из локальных подземных вод, пересекает глобальную линию метеорных вод. Верхние слои льда располагаются на графике справа, нижние - слева, причем расстояние между точками постепенно увеличивается, особенно в нижней половине графика. Это, скорее всего, также указывает на существование одного цикла промерзания в закрытой системе без утечки воды.

Хорошо известно, [\[39\]](#) что если скорость промерзания воды превышает 2 мм/ч, или если остаточная вода не была интенсивно перемешана в процессе промерзания, то равновесные условия не достигаются, и происходит заметное изотопное фракционирование. При скорости промерзания 5 мм/ч, изотопное фракционирование составляет только около 50% от равновесных значений.

При формировании сезонных бугров пучения в Медвежьих Скалах, когда лед образуется под горизонтом мёрзлого грунта, скорость образования льда, по данным Р.ван Эвердингена [\[38\]](#), была менее 2 мм/ч, при этом маловероятно, что оставшаяся вода интенсивно перемешивалась.

Во льду сезонного бугра пучения, формирующегося в равновесных условиях закрытой системы, идет длительный процесс медленного промерзания с постоянно сокращающимся объемом незамерзшей воды или суспензии. При этом вначале должны формироваться изотопически более тяжелые льды, а на конечной стадии промерзания - самые легкие льды (существенно более легкие, чем исходная вода). Процесс замерзания в такой закрытой системе может быть описан уравнением дистилляции Релея. Средний изотопный состав большей части льда, образовавшегося в закрытой системе, тем не менее, равен изотопному составу воды источника.

Собственно говоря, при формировании сегрегационной или инъекционно-сегрегационной линзы льда в условиях закрытой системы изотопное обеднение остающейся воды (и льда, из неё формирующегося) на самой финальной стадии промерзания может быть легче исходной воды и на 10% и даже на 20%. [\[34\]](#)

Осредненные значения $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и ^3H для образцов льда бугров пучения в районе Норз Форк Пасс равны соответственно $-22,5\text{‰}$, -171‰ и 149 ТЕ и близки к значениям, полученным для локальных подземных вод, т.е. состав подземных вод сходен с составом вод, изливающихся из источников и формирующих лед бугров пучения [\[38\]](#).

Однако не всегда формирование бугров пучения происходит в течение одного цикла.

Так, результаты проведенных Р.ван Эвердингеном^[38] полевых наблюдений и автоматической покадровой фотосъемки сезонных бугров пучения в Медвежьих Скалах указывают, что некоторые из них могут разрываться, высыхать и повторно формироваться в течение единого цикла их развития. Подобные события отражаются на изотопных кривых льда резкими переходами к менее отрицательным, чем для подземных вод, значениям изотопного состава, сопровождающимися прогрессивным обеднением изотопами с глубиной (см. рис. 19, а).

На основании изучения изотопного состава воды и льда Р.ван Эвердинген предположил схему развития сезонных бугров пучения. На первом этапе в начале зимы промерзание быстро охватывает водонасыщенный деятельный слой, снижая проницаемость пород и запас тепла и ограничивая перемещение воды; замерзание воды источников приводит также к образованию наледей на поверхности. Дальнейшее промерзание грунта и формирование наледей может привести к промерзанию участков разгрузки источников и к увеличению гидравлического потенциала, что способствует выпучиванию сезонно-мёрзлого грунта и перекрывающей его наледи. Реальное поднятие произойдет в точке или в нескольких точках, где будет наиболее благоприятное сочетание относительно низкого сопротивления мерзлых грунтов деформации и относительно быстрого поступления воды.

Такие участки расположены, прежде всего, на каналах разгрузки источников. Возможно, что распределение сезонных бугров пучения в Медвежьих Скалах отражает существование системы небольших таликов, из которых вверх поступает небольшое количество воды.

Вода, внедрившаяся в бугор пучения, замерзает постепенно сверху-вниз, формируя чистый лед. Поскольку скорость пучения может быть очень велика и достигает 0,55 м/день (это беспрецедентная скорость пучения была напрямую установлена Р.ван Эвердингеном посредством непрерывной фотосъемки сезонных бугров пучения в долине р.Медвежьей - van Everdingen^[38, стр. 254]), нередко происходит разрыв перекрывающего мёрзлого грунта.

Сравнение изотопных данных, полученных по льду бугров пучения Медвежьих Скал и района Норз Форк Пасс, показывает близкие значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ и примерно одинаковый диапазон вариаций изотопного состава (рис. 21). Так, во льду бугров пучения в Медвежьих Скалах значения $\delta^{18}\text{O}$ варьировали от -22‰ до $-27,5\text{‰}$, во льду бугров пучения в районе Норз Форк Пасс – от -21‰ до $-26,5\text{‰}$; значения $\delta^2\text{H}$ – от -130‰ до -180‰ и от -160‰ до -200‰ , соответственно. Таким образом, вариации $\delta^{18}\text{O}$ составили около $5,5\text{‰}$, а $\delta^2\text{H}$ – $40\text{--}50\text{‰}$. Это отражает как близкий среднегодовой изотопный состав подземных вод (и соответственно атмосферных осадков), так и условия закрытой системы, в которых они формировались.

Изотопные данные, полученные Р.ван Эвердингеном^[38] и Ф.Майклом^[47] показали, что источником формирования ледяных ядер исследованных ими сезонных бугров пучения являются локальные подземные воды, пополняемые атмосферными осадками, при этом необходимо от 5 до 15 лет, чтобы подземные воды достигли области разгрузки.

Изотопный состав льда сезонных бугров пучения в Чарской котловине

Диапазон и распределение по вертикали значений $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ льда сезонных бугров пучения. В сезонных буграх пучения, исследованных в Чарской котловине, вариации

значений изотопного состава составили от 2,5 до почти 4‰ по значениям $\delta^{18}\text{O}$ и от 15 до 23‰ по значениям $\delta^2\text{H}$. При этом для бугра Чара 1 отмечено постепенное снижение значений изотопного состава с глубиной (рис. 21) от -16,6 до -19,1‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и от -129,3 до -144‰ для $\delta^2\text{H}$; для бугра Чара 2 отмечено снижение значений сверху-вниз до глубины 20-25 см - от -16,7 до -18,2‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и от -129,9 до -139,3‰ для $\delta^2\text{H}$, в нижних 7-10 см части льда наблюдалось резкое увеличение значений до -15,4‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и до -122,6‰ для $\delta^2\text{H}$ (рис. 21). Во льду, отобранном по горизонтали, получены очень близкие значения изотопного состава, что указывает на почти горизонтальное намораживание слоев льда.

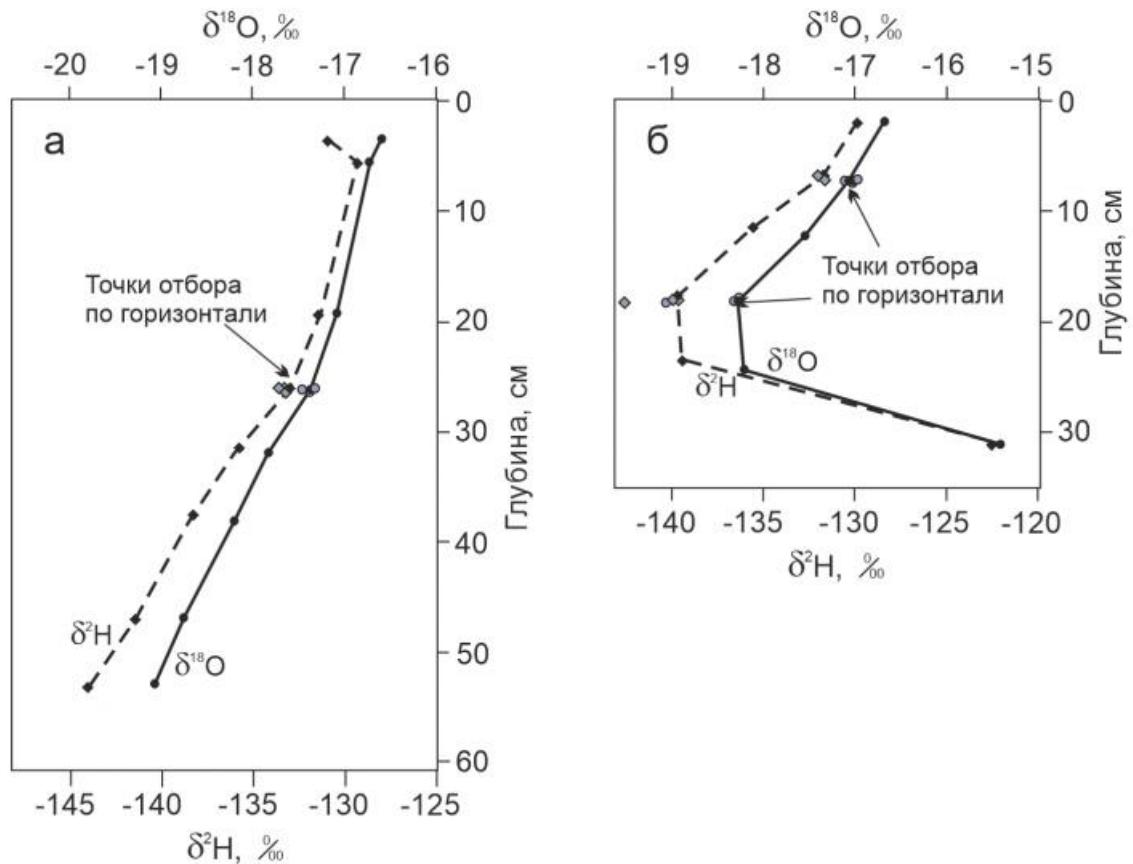


Рис. 21. Распределение значений $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ льда сезонных бугров пучения в Чарской котловине: а – бугор 1, б – бугор 2

Соотношение величин $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ льда сезонных бугров пучения. На совместной диаграмме $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ точки сезонных бугров Чарской котловины образуют линии с наклоном 5,82 (бугор 1) и 5,95 (бугор 2); наклоны этих линий заметно ниже, чем ГЛМВ (рис. 22). Такие значения наклона линий соотношения $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ во льду бугров отражают промерзание в закрытой системе, т.к. известно, что лед, формирующийся в закрытой системе, обычно характеризуется наклоном линии $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ меньше 7,3. Также это может отражать состав воды-источника и показывать влияние испарения на ее изотопный состав. На рис. 22 видно, что точки изотопного состава рек Чара и Беркакит также лежат на линии изотопного состава бугров, а не на ГЛМВ. Возможно, что вода рек и неглубоко залегающих подземных вод испытывают влияние испарения в течение жарких летних месяцев в условиях резко континентального климата.

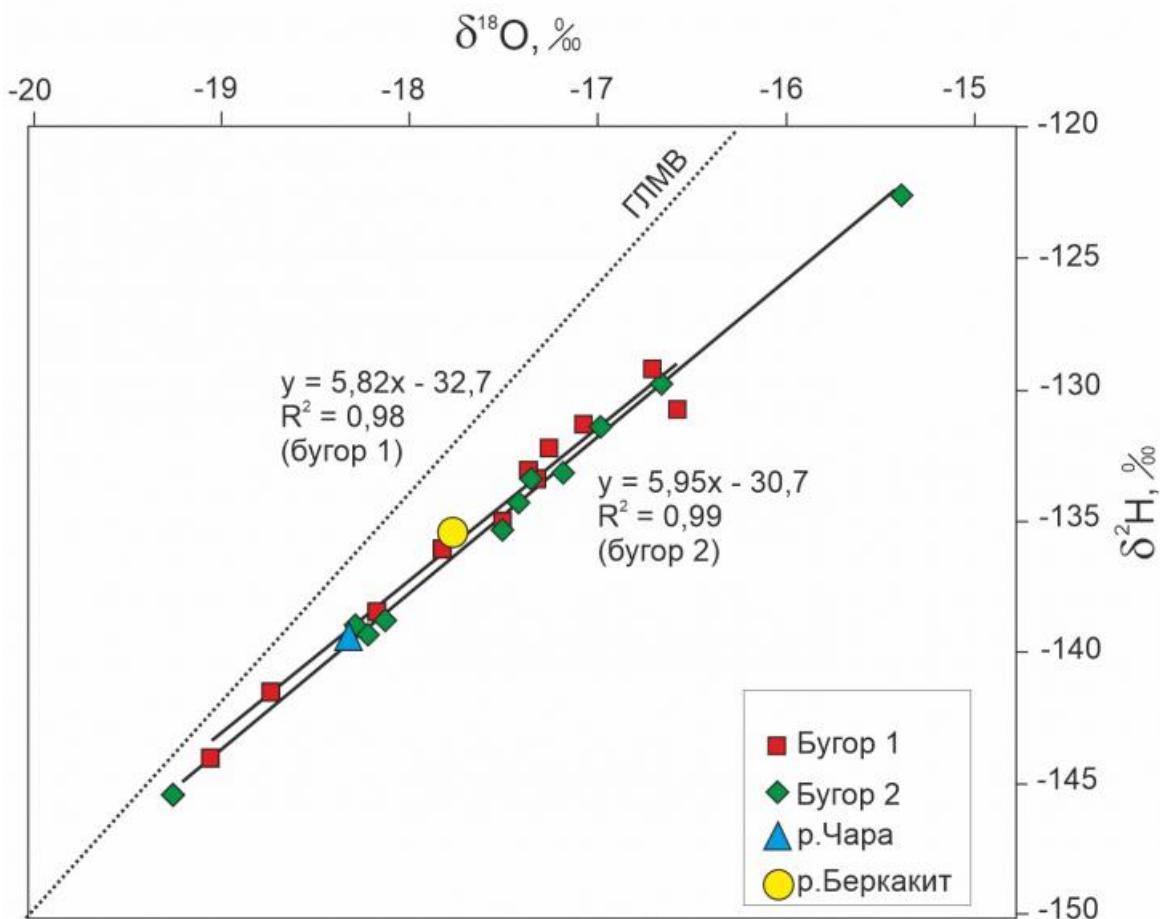


Рис. 22. Диаграммы соотношения величин $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ льда сезонных бугров пучения в Чарской котловине

Сопоставление изотопных кривых по льду бугров пучения показывает прогрессивное уменьшение содержания тяжелых изотопов с глубиной, что свидетельствует о сокращении объема оставшейся незамерзшей воды в процессе ее промерзания в условиях почти идеальной закрытой системы. Постоянное, без заметных скачков, уменьшение содержания тяжелых изотопов при промерзании свидетельствует о том, что процесс фракционирования не прерывался в течение всего цикла промерзания (рис. 23, б, в), т.е. бугры пучения могут формироваться в течение одного цикла промерзания, при этом перемещение фронта промерзания, имеющего горизонтальное или слабовыпуклое положение, происходит сверху-вниз.

Резкие сдвиги на изотопных кривых в сторону более положительных значений (рис. 23, а, г) свидетельствует о возможном перерыве и повторном формировании бугров пучения в течение зимы.

Для Бугра 2 в долине р.Чара характер изотопной кривой (наиболее низкие значения в центральной части ледяного ядра и более высокие в верхней и нижней частях) может указывать на двустороннее промерзание – сверху и снизу – замкнутого объема воды.

Изотопный состав исходной воды, из которой образовались бугры пучения в долине р.Чара, можно определить исходя из изотопного состава льда в верхней части бугров, если принять, что промерзание происходило сверху-вниз. Известно, что при промерзании воды в условиях закрытой системы, первые порции льда изотопно тяжелее воды на 1,5-2‰ по значениям $\delta^{18}\text{O}$ при быстром промерзании и 2-3‰ по значениям

$\delta^{18}\text{O}$ при медленном промерзании, что обусловлено разными коэффициентами изотопного фракционирования при разной скорости перехода воды в лед [34,38,47]. Лед в верхней части бугров имеет значения $\delta^{18}\text{O}$ $-16,6$, $-17\text{\textperthousand}$ (см. табл. 3), скорее всего, промерзание происходило довольно быстро в условиях низких зимних температур воздуха, поэтому изотопная сдвигка с исходной водой, скорее всего, не превышала 2\textperthousand , т.е. она могла иметь значение $\delta^{18}\text{O}$ около -18 , $-19\text{\textperthousand}$ (см. табл. 3, рис. 22), что близко к значениям, полученным для рек Чара и Беркакит.

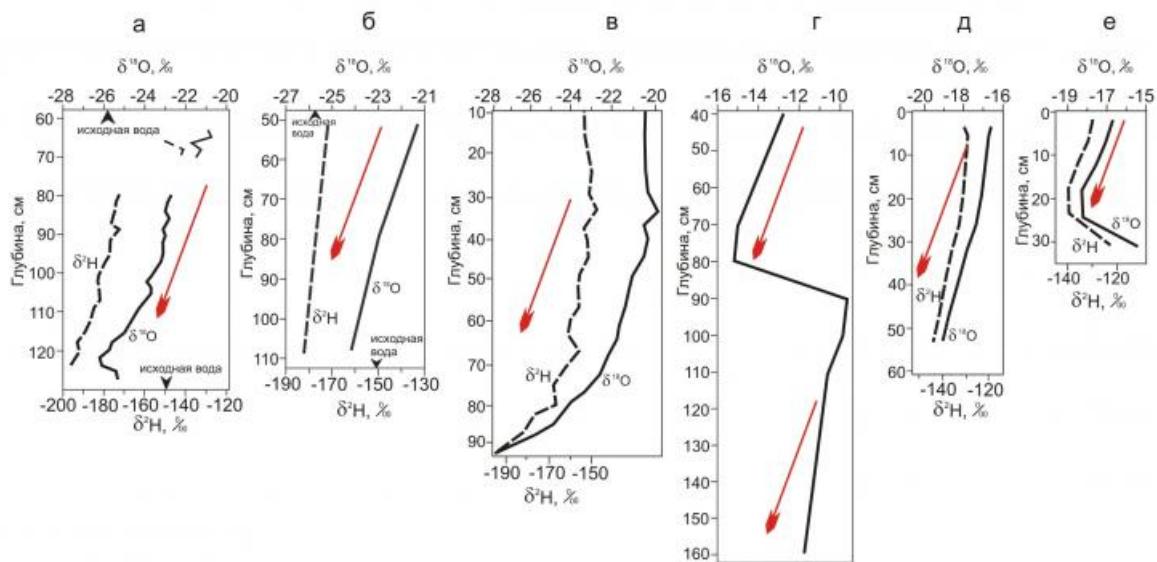


Рис. 23. Сопоставление изотопных кривых по льду сезонных бугров пучения, исследованных в разных районах криолитозоны: северная Канада: а, б - район Медвежьих Скал (по R.van Everdingen [38]), в - район Норз Форк Пасс (по F.Michel [47]); Чукотка: г - р.Чульхевеем (по Ю.К.Васильчуку [34]); д - р. Чара, бугор 1; е - р. Чара, бугор 2; стрелки показывают общий для всех бугров тренд снижения значений изотопного состава с глубиной

Сопоставление изотопных кривых по льду бугров пучения показывает прогрессивное уменьшение содержания тяжелых изотопов с глубиной, что свидетельствует о сокращении объема оставшейся незамерзшей воды в процессе ее промерзания в условиях почти идеальной закрытой системы. Постоянное, без заметных скачков, уменьшение содержания тяжелых изотопов при промерзании свидетельствует о том, что процесс фракционирования не прерывался в течение всего цикла промерзания (рис. 23, б, в), т.е. бугры пучения могут формироваться в течение одного цикла промерзания, при этом перемещение фронта промерзания, имеющего горизонтальное или слабовыпуклое положение, происходит сверху-вниз.

Резкие сдвиги на изотопных кривых в сторону более положительных значений (рис. 23, а, г) свидетельствует о возможном перерыве и повторном формировании бугров пучения в течение зимы.

Выводы

Исследование изотопного состава льда сезонных бугров пучения позволило установить, что:

1. В Чарской котловине широко развиты сезонные бугры пучения высота которых варьирует от 1 до 3-5 (а иногда и более метров) с ледяным ядром, мощностью от 1

- до 3 м, диаметром от 1-2 до 10-15 и более метров. В отдельные годы весной и в начале лета, во время максимального пучения, размеры однолетних бугров пучения здесь достигают 10 м в высоту и от 20 до 100 м в поперечнике.
2. Сезонные бугры пучения формируются преимущественно за счет промерзания переувлажненного сезонно-талого слоя (СТС) сверху-вниз, но иногда часть льда намерзает снизу-вверх при встречном промерзании пород на нижней границе СТС.
 3. Направление и условия промерзания фиксируются в изотопной записи: изотопный состав льда сезонных бугров пучения облегчается (т.е. значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ снижаются) с глубиной – для бугра 1 это снижение составило 2,5 и 15‰ для значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, соответственно. Для бугра 2 установлено снижение значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ на 1,5 и 10‰, соответственно, для большей части ледяного ядра, однако в нижней части отмечено резкое повышение значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ на 2,8 и 17‰ (из-за промерзания снизу), соответственно.
 4. Наклоны линий соотношения $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ для льда бугров составляют 5,82 (бугор 1) и 5,95 (бугор 2). Снижение значений изотопного состава льда бугров с глубиной и наклон линии соотношения $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ меньше 7,3 указывает на промерзание воды в условиях закрытой системы, в течение одного цикла, без подтока влаги. Распределение изотопных значений во льду бугра 2 может указывать на одновременное двустороннее промерзание объема воды.
 5. Источником воды для формирования сезонных бугров пучения могли быть неглубоко залегающие воды, скорее всего сезонно-талого слоя, со значением $\delta^{18}\text{O}$ перед промерзанием около -18, -19‰. Близкие значения были получены для рек Чара и Беркакит в районе исследований.
 6. В слоях льда, отобранных по горизонтали, получены очень близкие значения изотопного состава (например в бугре 1 по значениям $\delta^{18}\text{O}$ от -17,51 до -17,32‰), что указывает на последовательное горизонтальное намораживание слоев льда.
 7. Сопоставление изотопных кривых по льду сезонных бугров пучения в Чаре с сезонными буграми, исследованными в разных районах криолитозоны, показывает близкий характер распределения значений изотопного состава, характерный для промерзания в условиях закрытой системы.
 8. Циклический характер изотопной кривой (как например, для сезонного бугра пучения, исследованного в долине р.Чульхевеем на Чукотке), может отражать несколько циклов поступления новых порций воды и повторного промерзания

Благодарности

Авторы признательны В.Г. Подгорбунскому и Ю.В. Станиловской за предоставленные материалы.

Библиография

1. Пономарёва О.Е. Мониторинг динамики поверхности бугров пучения вдоль трассы газопровода Надым-Пунга (северная тайга Западной Сибири) // Материалы третьей конференции геокриологов России. МГУ им. М.В. Ломоносова, 1-3 июня 2005 г. Т. 2. Ч. 3. Динамическая геокриология. Изд-во Моск. ун-та, 2005. С. 141-146.
2. Москаленко Н.Г., Пономарёва О.Е., Устинова Е.В. Мониторинг экзогенных геологических процессов на трассе газопровода Надым-Пунга // Инженерные изыскания. 2007. №1. С. 34-36.
3. Брушков А.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Железняк М.Н., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Осокин А.Б. Принципы организации государственного мониторинга вечной

- мерзлоты // *Материалы Шестой конф. геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне»* (14 – 17 июня 2022 г., г. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, геол. ф-т). С. 5–11. М.: КДУ, 2022.
4. Шестерnev Д.М. Криолитозона, климат и экономическое развитие Забайкалья // *Наука в Сибири*. 2009. №45 (2730). 7 с.
 5. Шестерnev Д.М., Шестерnev Д.Д. Пучение крупнообломочных пород Читино-Ингондинской впадины в связи с потеплением климата // *Криосфера Земли*. 2007. Т. XI. №4. С. 80–92.
 6. Александров А.С., Железняк И.И., Мосенкис Ю.М. *Инженерное освоение криолитозоны Забайкалья*. Наука. Сиб. отд-ние. 1990. 104 с.
 7. Втюрина Е.А. Геокриологические явления и создаваемые ими формы рельефа в Юго-Восточном Забайкалье // *Труды ин-та мерзлотоведения*. Том 18. М.: 1962. С. 17–25.
 8. Баранов И.Я. Южная окраина области многолетней мерзлоты // *Гидрогеология СССР*. М. -Л., Госгеолтехиздат, 1940, Вып. 17, Вост. Сибирь. Кн. 2.
 9. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Чижова Ю.Н., Станиловская Ю.В. Миграционные бугры пучения в криолитозоне Восточной Сибири и Дальнего Востока // *Инженерная геология*. 2014. №1. С. 40–64.
 10. Лапердин В.К., Качура Р.А. Криогенные опасности в зоне линейных природно-технических комплексов на юге Восточной Сибири // *Криосфера Земли*. 2009. Том XIII. №2. С. 27–34.
 11. Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Сер. Бодайбинская. Лист О-50-XXIX. Объяснительная записка. – М.: Мингео СССР, Объед. «Аэрогеология». 1984. 117 с.
 12. Атлас Забайкалья (Бурятская АССР и Читинская область). М.-Иркутск: ГУГК, 1967. 176 с.
 13. Природные условия освоения севера Читинской области. М.: Изд-во АН СССР, 1962. №М-117В. 124 с.
 14. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / Под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1989. 515 с.
 15. Сергеев Д.О., Чеснокова И.В. Выявление характера теплообмена в слое сезонного оттаивания по данным режимных термометрических наблюдений (Чара, северное Забайкалье) // *Материалы пятой конференции геокриологов России* (МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, 14–17 июня 2016 г.), 2016. 6 с.
 16. Железняк М.Н., Жидин В.И., Сериков С.И. Геокриологические условия Олекмо-Чарского поднятия в зоне проектируемых линейных сооружений на участке Икабъекан-Тарыннах // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. №6. С. 1675.
 17. Калиничева С.В. Идентификация и картографирование вечной мерзлоты и таликов с использованием спутниковых изображений (на примере Олекмо-Чарского нагорья в Южной Якутии) // *Дистанционные методы исследования Земли*. 2018. С. 71–82. doi: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-71-82
 18. Заболотник С.И., Клиновский И.В. Сезонное протаивание и промерзание грунтов в Чарской котловине // *Геокриологические условия Забайкальского севера*. М.: Наука, 1966. С. 162–171.
 19. Сергеев Д.О. *Формирование и эволюция курумов в гольцовом поясе гор (на примере хр. Удокан, Северное Забайкалье)* / Автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, геол. ф-т., 1991. 20 с.
 20. Алексеев В.Р. Курумы – феномен криосферы // *Наука и техника в Якутии*. 2018. №1 (34). С. 72–88.
 21. Рыжов Ю.В., Голубцов В.А. Экзогенные процессы и почвообразование в малом речном бассейне Западного Забайкалья во второй половине голоцена // *География и природные ресурсы*. 2017. №3. С. 87–96. doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-3(87-96)

22. Коннов В.И. Наледеобразование и пучение грунтов на участках дорог в Забайкалье // *Междунар. научн.-практ. конф. «Техносферная безопасность Байкальского региона»* (1–18 сент., 2017 г., г. Чита – парк Алханай). Чита: Изд-во ЗабГУ, 2017. С. 37–43.
23. *Метеостанция Чара: климат Чары; Летопись погоды в Чаре*. [Электронный ресурс]. База данных содержит данные метеонаблюдений на метеостанции в с. Чара. Режим доступа – открытый. Дата обращения 16.05.2024. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/30372.htm>
24. *Климатические параметры зоны освоения Байкало-Амурской магистрали. Справочное пособие*. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 133 с.
25. Забайкальский край // *Национальный атлас почв Российской Федерации* / под ред. чл.-корр. РАН С.А. Шобы. М.: Изд-во «Астрель». 2011. С. 550–553.
26. Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П., Буданцева Н.А., Васильчук Д.Ю. Криогенные почвы в долине реки Чара, Забайкалье // Арктика и Антарктика. 2022. № 3. С. 54–91. DOI: 10.7256/2453-8922.2022.3.38689 EDN: JIVEUJ URL: https://e-notabene.ru/arctic/article_38689.html
27. Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П. Радиальная дифференциация химического состава криогенных почв долины реки Чары, Северное Забайкалье // Арктика и Антарктика. 2023. № 2. С. 115–128. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.2.40965 EDN: HGVJAS URL: https://e-notabene.ru/arctic/article_40965.html
28. Гинзбург А.П., Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук Дж.Ю., Васильчук А.К. Геохимия мерзлотных почв постпирогенных лиственничников Чарской котловины (Северное Забайкалье) // *Актуальные проблемы и перспективы развития геокриологии. Материалы VII Всероссийского научного молодежного геокриологического форума с международным участием, посвященного 150-летию и 100-летию со дня рождения ученых-мерзлотоведов Михаила Ивановича Сумгина и Кирилла Фабиановича Войтковского*, Якутск, Россия, 27 июня – 07 июля 2023 г. Якутск. 2023. С. 52–55.
29. Незнаева С.В. Эколого-геохимическая специфика миграции химических элементов в почвенных катенах Чарской котловины (Забайкальский край, Каларский район) // *Материалы Международной научной конференции XXVII Докучаевские молодежные чтения «Традиции и инновации в почтоведении»* / Под ред. Б.Ф. Апарина. СПб., 2024. С. 47–48.
30. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // *Tellus*. 1964. V. 16. P. 436–468.
31. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A. C., Stanilovskaya Ju.V. Early Holocene climate signals from stable isotope composition of ice wedge in the Chara Basin, Northern Transbaikalia, Russia // *Geoscience Frontiers*. 2018. Vol. 9. Iss. 2. P. 471–483. doi: 10.1016/j.gsf.2017.04.008.
32. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., Budantseva N. A., Ginzburg A.P., Tokarev I.V., Vasil'chuk J.Yu. Early Holocene oxygen isotope chronologies (11,267–6420 cal BP) from ice wedge at Chara, Transbaikalia. *Radiocarbon*. 2024. Vol. 66. Iss. 2. P. 400–409. doi:10.1017/RDC.2024.34.
33. Васильчук Ю.К. Изотопные вариации во льду торфяных и ледо-минеральных бугров пучения – пальца и литальца // Арктика и Антарктика. 2018. № 1. С. 1–49.
34. Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций). М.: Изд. Отдела теоретических проблем РАН. Геол. Ф-т МГУ, ПНИИИС. 1992. В 2-х томах. Том 1. 420 с. Т.2. 264 с. (Vasil'chuk Yu. K. 1992: *Oxygen isotope composition of ground ice (application to paleogeocryological reconstructions)*. Volume 1, 420 pp., Volume 2, 264 pp. Theoretical Problems Department, Russian Academy of Sciences and Lomonosov Moscow University Publications, Moscow (in Russian with English contents section).
35. Pollard W.H., French H.M. Seasonal frost mound occurrence, North Fork Pass, Ogilvie

- Mountains, northern Yukon, Canada // *Permafrost. Fourth International Conference. Proceedings.* Vol. 1. 1983. P. 1000–1004.
36. Pollard W.H., French H.M. The groundwater hydraulics of seasonal frost mounds, North Fork Pass, Yukon Territory // *Canadian Journal of Earth Sciences.* 1984. Vol. 21. P. 1073–1081.
37. Pollard W.H., French H.M. The internal structure and ice crystallography of seasonal frost mounds // *Journal of Glaciology.* 1985. Vol. 31. P. 157–162.
38. van Everdingen, R.O. Frost blisters of the Bear Rock Spring area near Fort Norman, N.W.T. // *Arctic.* 1982. Vol. 35. P. 243–265.
39. van Everdingen R.O. Frost mounds at Bear Rock. near Fort Norman, Northwest Territories 1975–1976 // *Canadian Journal of Earth Sciences.* 1978. Vol. 15. P. 263–276.
40. Hinkel, K. M., Peterson, K. M., Eisner, W. R., Nelson, F. E., Turner, K. M., Miller, L. L., Outcalt, S. I. (1996). Formation of injection frost mounds over winter 1995–1996 at barrow, Alaska // *Polar Geography,* 1996. Vol. 20(4), 235–248.
<https://doi.org/10.1080/10889379609377605>.
41. Голубчиков М.Ю., Горлова Л.Г., Перминова Е.С. Исследование сезонного природно-техногенного гидролакколита в Норильском промышленном районе // *Материалы третьей конференции геокриологов России. Том 2. Часть 3. Динамическая геокриология.* М.: МГУ. 2005. С. 72–73.
42. Гречищев С.Е., Шешин Ю.Б. Развитие некоторых криогенных физико-геологических процессов в основаниях северных аэродромов // *Journal of Geocryology.* 2000. Vol. 2.
43. Morse P.D., Burn C.R. Perennial frost blisters of the outer Mackenzie Delta, western Arctic coast, Canada // *Earth Surf. Process. Land.* 2014. Vol. 39. Iss. 2. P. 200–213.
44. Paquette M., Fortier D., Lamoureux S.F. Cryostratigraphical studies of ground ice formation and distribution in a High Arctic polar desert landscape, Resolute Bay, Nunavut // *Canadian Journal of Earth Sciences.* 2022. Vol. 59(11). P. 759–771. doi:10.1139/cjes-2020-0134.
45. Ponti S., Scipinotti R., Pierattini S., Guglielmin M. The Spatio-Temporal Variability of Frost Blisters in a Perennial Frozen Lake along the Antarctic Coast as Indicator of the Groundwater Supply // *Remote Sensing.* 2021. Vol. 13. N3. 435. doi:10.3390/rs13030435.
46. Mackay J.R. Oxygen isotope variations in permafrost, Tuktoyaktuk Peninsula area, Northwest Territories // *Geological Survey of Canada. Current Research. Part B. Paper 83-1B.* 1983. P. 67–74.
47. Michel F.A. Isotope geochemistry of frost-blister ice, North Fork Pass, Yukon, Canada // *Canadian Journal of Earth Sciences.* 1986. Vol. 23. N 4. P. 543–549.
48. Froehlich W., Slupik J. Frost mounds as indicators of water transmission zones in the active layer of permafrost during the winter season (Khangai Mts., Mongolia) // *Permafrost. Third International Conference. Proceedings.* National Research Council of Canada. Vol. 1. 1978. P. 189–193.
49. Yoshikawa K. The groundwater hydraulics open system pingos // *Permafrost. Seventh International Conference, Proceedings.* Yellowknife, 23–27 June 1998, Eds. A.G. Lewkowicz and M. Allard. Universite Laval, Collection Nordicana. 1998. N 57. P. 1177–1184.

Результаты процедуры рецензирования статьи

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

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

Предмет исследования являются, по мнению автора, детальное исследование изотопного состава линз льда в ядре сезонных бугров пучения в Чарской котловине,

выявление направления и условий промерзания, зафиксированных в изотопной записи, установление изотопного состава воды из которой сформировались ледяные линзы в ядре сезонных бугров пучения и сопоставление изотопных кривых по льду сезонных бугров пучения в Чаре с изотопными данными изо льда сезонных бугров, исследованных в разных районах криолитозоны России и Канады.

Методология исследования исходя из анализа статьи можно сделать вывод о использовании лазерного инфракрасном спектрометре Picarro L 2130-i для измерения изотопного состава кислорода и водорода льда в Ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парке Санкт-Петербургского государственного университета на основе международных стандартов, определение радиоуглеродного возраста методом жидкостной сцинтилляции, послойные описания строения исследованных бугров пучения северо-западной части песчаного массива Чарские пески в проороллессе полевых исследований. Автором также использовался метод литературного анализа, сравнительных характеристик объектов и процессов алгоритмического и математического моделирования.

Актуальность затронутой темы связано с тем, что исследование криогенного пучения грунтов, выражающееся в увеличении объема грунта ввиду промерзания содержащейся в нем гравитационной влаги, способно наносить значительный урон за счет активизации многочисленных экзогенных геологических процессов, связанных с вытаиванием льда и течению каменных глетчеров, заболачиванию, термокарсту и термоэрозии. Автор восполнил этот пробел.

Научная новизна заключается в том, что автор статьи на основе проведенных исследований изотопного состава льда сезонных бугров пучения установил, что сопоставление изотопных кривых по льду сезонных бугров пучения в Чаре с сезонными буграми показывает близкий характер распределения значений изотопного состава, характерный для промерзания в условиях закрытой системы, а цикличный характер изотопной кривой может отражать несколько циклов поступления новых порций воды и повторного промерзания. Автором направление и условия промерзания зафиксированы в изотопной записи состава льда сезонных бугров пучения, источником воды для формирования которых могут быть неглубоко залегающие сезонно-талого слоя воды. Сезонные бугры пучения формируются преимущественно за счет промерзания переувлажненного сезонно-талого слоя сверху-вниз, но иногда часть льда намерзает снизу-вверх при встречном промерзании пород на нижней границе.

Стиль, структура, содержание стиля изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, рисунки, фотографии и схемы иллюстративны уместны.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволяющие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.