

Арктика и Антарктика*Правильная ссылка на статью:*

Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П., Сысолятин Р.Г., Токарев И.В., Королёва Е.С., Паламарчук В.А., Буданцева Н.А., Васильчук А.К. Криолитологическое строение и распределение стабильных изотопов кислорода и водорода в разрезе плейстоценовых отложений, вскрытых глубокой скважиной в пос. Чурапча, Лено-Алданское междуречье // Арктика и Антарктика. 2024. № 3. С. 46-64. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.3.71544 EDN: NUGXLI URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=71544

Криолитологическое строение и распределение стабильных изотопов кислорода и водорода в разрезе плейстоценовых отложений, вскрытых глубокой скважиной в пос. Чурапча, Лено-Алданское междуречье

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; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова; географический факультет; кафедра геохимии ландшафтов и географии почв; младший научный сотрудник ; ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики»

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



✉ alexandrginzburg13154@yandex.ru

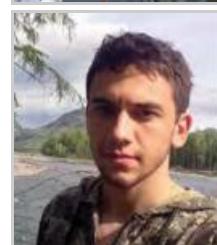
Сысолятин Роберт Гамлетович

ORCID: 0000-0003-2633-1919

кандидат геолого-минералогических наук

заведующий мерзлотной станцией ; Северо-Восточная научно-исследовательская мерзлотная станция института мерзлотоведения СО РАН

685000, Россия, Магаданская область, г. Магадан, ул. Портовая, 16



✉ robertseesaw@gmail.com

Токарев Игорь Владимирович

ORCID: 0000-0003-1095-0731

кандидат геолого-минералогических наук

ведущий специалист по изотопному анализу ; Научный парк Санкт-Петербургского государственного университета

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



✉ tokarevigor@gmail.com

Королёва Екатерина Сергеевна

кандидат геолого-минералогических наук

старший научный сотрудник; ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики»
629007, Россия, Ямало-Ненецкий автономный округ, г. Салехард, ул. Республики, 20, оф. 306

✉ koroleva_katy@inbox.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



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
ORCID: 0000-0003-1921-030X
доктор географических наук
ведущий научный сотрудник; лаборатория геоэкологии Севера; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. Ж10

✉ alla-vasilch@yandex.ru



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

DOI:

10.7256/2453-8922.2024.3.71544

EDN:

NUGXLI

Дата направления статьи в редакцию:

21-08-2024

Аннотация: Предметом исследования является криолитологическое строение плейстоценовых отложений, вскрытых глубокой скважиной в пос. Чурапча и распределение стабильных изотопов кислорода и водорода в текстурных

преимущественно шлировых льдах. Район расположен в области сплошного распространения многолетнемёрзлых пород, вертикальная мощность которых здесь достигает 400–500 м. Среднегодовая температура пород колеблется в пределах $-4,6\text{--}6,2^{\circ}\text{C}$, в долинах рек они повышены примерно до $-2\text{--}-1^{\circ}\text{C}$. Многолетнемёрзлые породы в районе Чурапчи отличаются относительно высокой льдистостью от 0,26–0,47 долей единицы. Лёд находится в породах в виде прослоев и формирует слоистую криотекстуру.

В ходе полевых работ исследованы мерзлые керны, вскрытые буровой скважиной, глубиной 30 м. Бурение выполнялось с помощью крупногабаритной буровой установки ПБУ-2 на базе грузового автомобиля КАМАЗ. Использовалась колонковая буровая труба диаметром 146 мм. Отбор образцов осуществлялся из мерзлого керна Скважиной вскрыты многолетнемёрзлые отложения, имеющие в основном тёмно-бурые и серые цвета окраски, в особенности сизовато-серые оттенки характерна для тяжёлых суглинков и глин. Сезонно-тальный слой имеет супесчаный состав, а ниже, на глубинах от 1,5 до 6,0 м отложения суглинистые. На глубинах 6,0–20,0 м наблюдается чередование слоёв суглинков и глин различной мощности, а ниже – резкая смена литологического состава на средний и мелкий песок (20,75 – 24,0 м), включающий большое количество слоёв органического вещества. Распределение значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{2}\text{H}$ изучено в текстурных льдах до глубины 17,7 м. В верхних 12 м изотопный состав заметно отрицательнее: значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют от $-29,44$ до $-34,35\text{‰}$, а величины $\delta^{2}\text{H}$ – от $-213,5$ до $-253,6\text{‰}$. В интервале 12–17,7 м значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют от $-25,94$ до -28‰ , а величины $\delta^{2}\text{H}$ – от $-195,3$ до $-214,3\text{‰}$.

Ключевые слова:

многолетнемерзлые породы, глубокая буровая скважина, поздний плейстоцен, подземные льды, криотекстура, изотопы кислорода, изотопы водорода, Чурапча, Лено-Алданское междуречье, Центральная Якутия

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".

Введение

В исследовании криолитозоны Сибирской платформы накоплен обширный материал о многолетнемерзлых породах (ММП), позволяющий охарактеризовать их современное термодинамическое состояние, найти количественные зависимости температуры и мощности ММП от комплекса природных факторов и выполнения палеореконструкции динамики ММП и достоверного прогноза геокриологических условий при освоении территории.^[1] Это особенно важно в связи с активной разработкой месторождений полезных ископаемых Сибирской платформы сосредоточенных преимущественно в зоне развития ММП: железных руд (Тарыннах, Таежное, Сулумат), каменного угля (Апсат, Эльге, Унгра), меди (Удокан, Чаруода, Чина), редких металлов (Катугино), титаномагнетитовых руд (Чина), полудрагоценных камней (Мурун), апатитов (Укдуска, Селигдар, Кабаханыр)^[1].

Серия структурных депрессий Алданского щита, сложенная породами мезозойского возраста и простирающаяся от р. Олёнма на западе до р. Идум на востоке известна под общим названием – мезозойские впадины. Месторождения углей на территории Чульманской и Токинской впадин составляют основу уникального Южно-Якутского

угольного бассейна (высококачественные коксующиеся угли составляют более 80% его запасов, разведанные запасы более 4 млрд тонн), Токариканская, Гувилгринская и Ытымджинская впадины сейчас рассматриваются как потенциально пригодные для разработки.^[2]

Геокриологическая изученность мезозойских впадин характеризуется крайней неоднородностью. Детально описанные многочисленными исследователями геокриологические условия Чульманской и Токинской впадин резко контрастируют в плане изученности с Токариканской, Гувилгринской и Ытымджинской впадинами, по которым имеются лишь единичные данные геокриологических условий.^[2]

Проект организации участков мониторинга за температурой многолетнемёрзлых пород на метеостанциях вдоль федеральной автодороги «Колыма» на территории Республики Саха (Якутия) назван Колымская мерзлотная трансекта. Это сеть из семи скважин глубиной 30 метров (Чурапча, Ытык-Кюель, Тёплый Ключ, Восточная, Агаякан, Томтор и Делянкир), расположенныхных вблизи площадок продолжительного наблюдения за метеопараметрами, которая создаётся для определения реакции температурного режима мёрзлых пород на изменение климатических факторов.^[2]

Одна из скважин в районе пос. Чурапча, пробурена с отбором керна, в том числе льда ледяных шлиров для изотопного анализа. Цель этой статьи – исследование распределение изотопного состава кислорода и водорода в текстурообразующих льдах Чурапчинской скважины до глубины 17,7 м и выявление основных различий формирования толщ разного изотопного состава.

Физико-географические условия района исследований

Географическое положение

Участок, на котором была заложена скважина, расположен в центральной части Лено-Алданского междуречья в Центральной Якутии на северо-западной окраине пос. Чурапча (рис. 1). Заложенная скважина имеет координаты 62°0'26.08" с.ш., 132°24'27.98" в.д.



Рис. 1. Картосхема ключевого участка исследований: 1 – расположение скважины; 2 – границы площадки метеостанции Чурапча; 3 – озёрно-аласные котловины; 4 – распространение термокарста. Составлена на основе космического снимка Google (Maxar Technologies), дата съёмки 17.07.2022.

Геологическое строение территории

Северная часть Лено-Алданского междуречья, где расположена Чурапча, сложена

комплексом полигенетичных четвертичных отложений различного состава. Так, к Западу и Северо-западу от Чуралчи, в долине р. Лены, фундамент территории представлен Юрскими осадочными породами, перекрытыми средне- и верхнеплейстоценовым аллювием пра-Лены и пра-Алдана. К востоку от Чуралчи, в районе п. Ытык-Кюель, наблюдаются несколько выходов меловых и неогеновых осадочных толщ, перекрытых озёрно-аллювиальными плиоценово-нижнеплейстоценовыми песками, илами и супесями, часто обогащёнными органогенным материалом.^[3] Непосредственно в районе Чуралчи широко распространены плейстоценовые многолетнемерзлые отложения, в том числе, ледового комплекса (едома) и озерные, включающие многочисленные фрагменты подземных льдов.^[4] (рис. 2).



Рис. 2. Обнажение подземных льдов в берегу термокарстового озера вблизи с. Чакыр (Чуралчинский район). Фото В.В. Огонерова

Рельеф и гидрографическая сеть

Территория представляет собой холмисто-западинную равнину с абсолютными высотами 300–400 м, редко пересечённую долинами мелких и средних рек, а также испещрённую термокарстовыми озёрами разных размеров.^[4-6] Активное таяние ММП играет важную роль в перераспределении поверхностного стока воды, способствуя образованию новых котловин стока и временных водотоков.

Многолетнемерзлые породы и криогенные процессы

Район исследований расположен в области сплошного распространения ММП, вертикальная мощность которых здесь достигает 400–500 м. Под руслами крупных рек (Лена, Алдан, Амга) здесь развиты сквозные талики.^[7] На Лено-Алданском междуречье среднегодовая температура пород колеблется в пределах $-4,6 - -6,2^{\circ}\text{C}$, в долинах рек они повышены примерно до $-2 - -1^{\circ}\text{C}$. При этом отмечаются довольно сильные отклонения от среднеширотных значений.

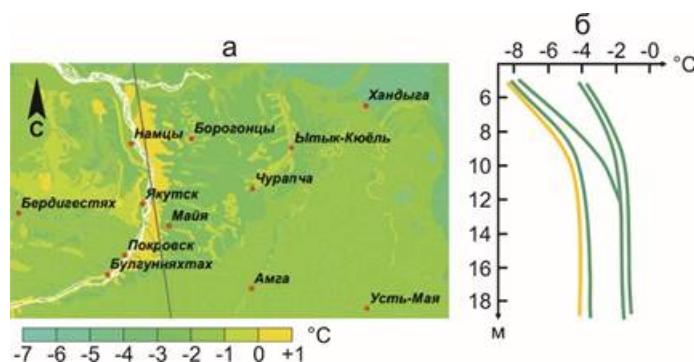


Рис. 3. Районирование территории Центральной Якутии по среднегодовым температурам ММП на глубинах нулевых сезонных колебаний (а)^[8] и вертикальные распределения

температур ММП на Лено-Алданском междуречье (б): III терраса (жёлтая) и низкая и высокая поймы (зелёные). Из [7]

ММП в районе Чурапчи отличаются относительно высокой льдистостью от 0,26 – 0,47 д.е. Лёд находится в породах в виде прослоев и формирует слоистую криотекстуру. Повышенная льдистость верхнего слоя мёрзлых пород способствует активизации процессов термокарста в летний период, а достаточно глубокое протаивание, в среднем около 1,5 – 2,0 м за год, приводит к оттаиванию жильных льдов, включённых в едомные отложения. Средняя глубина залегания голов ледяных жил здесь составляет 1,7 м в долинах рек и 2,1 м на междуречьях.[8,9,10] Доля площади территории, поражённая термокарстом, в окрестностях Чурапчи термокарстом достигает 70%[11] вследствие чего большая часть территории, пригодной для ведения сельского хозяйства в настоящее время деградирует.[10] В пределах самого посёлка зафиксированы антропогенные снижения температур ММП и антропогенно-спровоцированная активизация термокарстовых процессов.[12]

Особенности климата

Климат Центральной Якутии резкоконтинентальный с продолжительной и очень холодной зимой и коротким жарким летом. Среднегодовая температура воздуха в п. Чурапча равна -8 – -9°C , за период с 1933 г. она возросла незначительно, примерно на 1 – $1,5^{\circ}\text{C}$. Среднеянварская температура опускается примерно до -40 – -45°C , среднеиюльская поднимается до $+18$ – $+21^{\circ}\text{C}$. За 90-летний срок метеонаблюдений эти температуры также выросли не более чем на $1,5^{\circ}\text{C}$. В течение года наибольшее количество атмосферных осадков выпадает в июле, нередко их количество достигает 100 мм/мес, а в зимний период их количество снижается примерно в 10 раз (рис. 4,б). Положительные температуры воздуха в Чурапче устанавливаются в середине – конце апреля, а отрицательные – в конце сентября (рис. 4,а). Высота снежного покрова относительно невысокая, не превышающая 0,5–0,7 м, вследствие чего в зимний период происходит достаточно глубокое промерзание пород, а большие амплитуды температур (около 80°C) обеспечивают сильное морозобойное растрескивание.

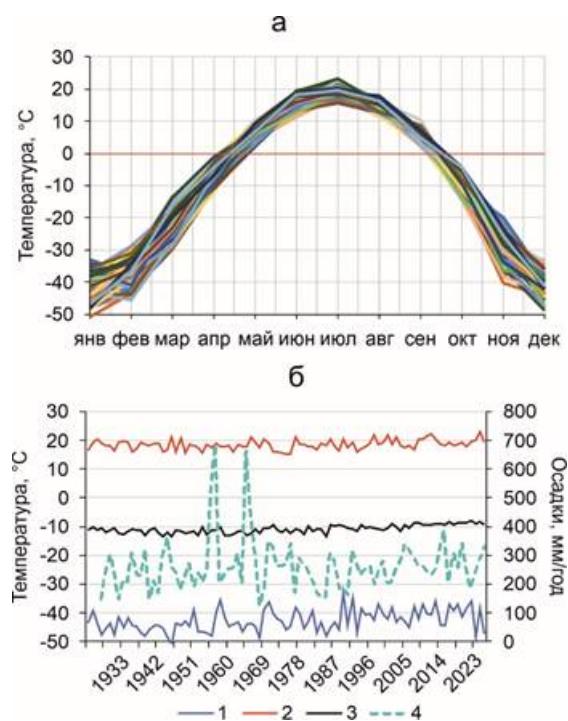


Рис. 4. Графики хода среднемесячных (а) и среднегодовых температур (б) на метеостанции Чурапча: 1 – среднеянварские; 2 – среднеиюльские; 3 – среднегодовые. 4 – среднегодовое количество осадков. По [13]

Почвы и растительный покров

Зональная растительность в районе Лено-Алданского междуречья представлена лиственничными лесами (*Larix sibirica*) с примесью ели (*Picea obovata*) и сосны (*Pinus sibirica*) бруснично-зеленомошными. [3] Леса распространены в основном на возвышенностях, не вовлечённых в сельское хозяйство. В низменностях более распространены участки степей и луговых степей, а также алассные котловины. [14] Эти участки активно распахиваются. [10]

Соответственно, зональными типами почв (по классификации и диагностике почв СССР [15]) являются мерзлотные таёжные палевые (в т.ч. осолоделые и оподзоленные) в комплексах с алассными почвами. [3] На степных участках встречены кальциевые солонцы (Calcic Solonetz), в т.ч. пахотные, а также солоди, в т.ч. оглеенные (Protocalcic Gleysols). [16]

Методы исследований

В ходе полевых работ авторами был исследован керн многолетнемерзлых отложений, в том числе, вероятно, ледовый комплекс (едома), вскрытые глубокой буровой скважиной. Скважина имеет глубину 30 м и оборудована с целью проведения мониторинга геотермического состояния многолетнемёрзлых пород. Эта скважина вошла в сеть геокриологического мониторинга на территории Якутии. Из скважины было отобрано 11 образцов мёрзлых пород и подземных льдов, в полевых условиях были проведены криолитологические описания кернов мёрзлых пород. В сегрегационных шлировых льдах, вскрытых скважиной, было проведено изучение изотопного состава кислорода и водорода.

Бурение скважины и отбор образцов

Глубокая 30-метровая буровая скважина была заложена на окраине пос. Чурапча в непосредственной близости от одноимённой метеостанции. Бурение выполнялось вертикально с помощью крупногабаритной буровой установки ПБУ-2 на базе грузового автомобиля КАМАЗ. Использовалась колонковая буровая труба диаметром 146 мм. В ходе бурения продувка и промывка не применялись. Отбор образцов осуществлялся из мерзлого керна, масса каждого образца достигала 500 г. Пробы упаковывались в два слоя пластиковых пакетов с застёжкой zip-lock.

Полевые описания кернов

В выбуруемых кернах в полевых условиях были произведены описания литологического состава и криотекстур. Литологическое описание включало цвет, структуру, пластичность, грунтовые и ледяные включения, характеристика криотекстур.

Лабораторные исследования

Предварительная обработка образца включала полное его оттаивание при комнатной температуре без доступа солнечного света и переливание в пластиковые матовые фляконы объёмом 30 мл с герметичной крышкой. Крышка дополнительно герметизировалась целлофановой прокладкой во избежание контакта газа в образце с

окружающим воздухом.

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 $\delta^{18}\text{O}$ – $\pm 0,02\text{ ‰}$, для $\delta^2\text{H}$ – $\pm 0,3\text{ ‰}$. Всего проанализировано 11 проб текстурных льдов.

Результаты

Литологическая колонка

Скважиной в районе пос. Чурапча были вскрыты отложения ледового комплекса, имеющие в основном тёмно-бурые и серые цвета окраски, в особенности сизовато-серые оттенки характерна для тяжёлых суглинков и глин. Сезонноталый слой, включающий почвенный профиль, имеет супесчаный состав, а ниже, на глубинах от 1,5 до 6,0 м отложения суглинистые (рис. 5, А). На глубинах 6,0–20,0 м наблюдается чередование слоёв суглинков и глин различной мощности, а ниже – резкая смена литологического состава на средний и мелкий песок (20,75–24,0 м), включающий большое количество слоёв органического вещества. Предположительно, это связано с предыдущими эпохами почвообразования или торфонакопления. Нижняя часть разреза представлена средним и тяжёлым суглинком.

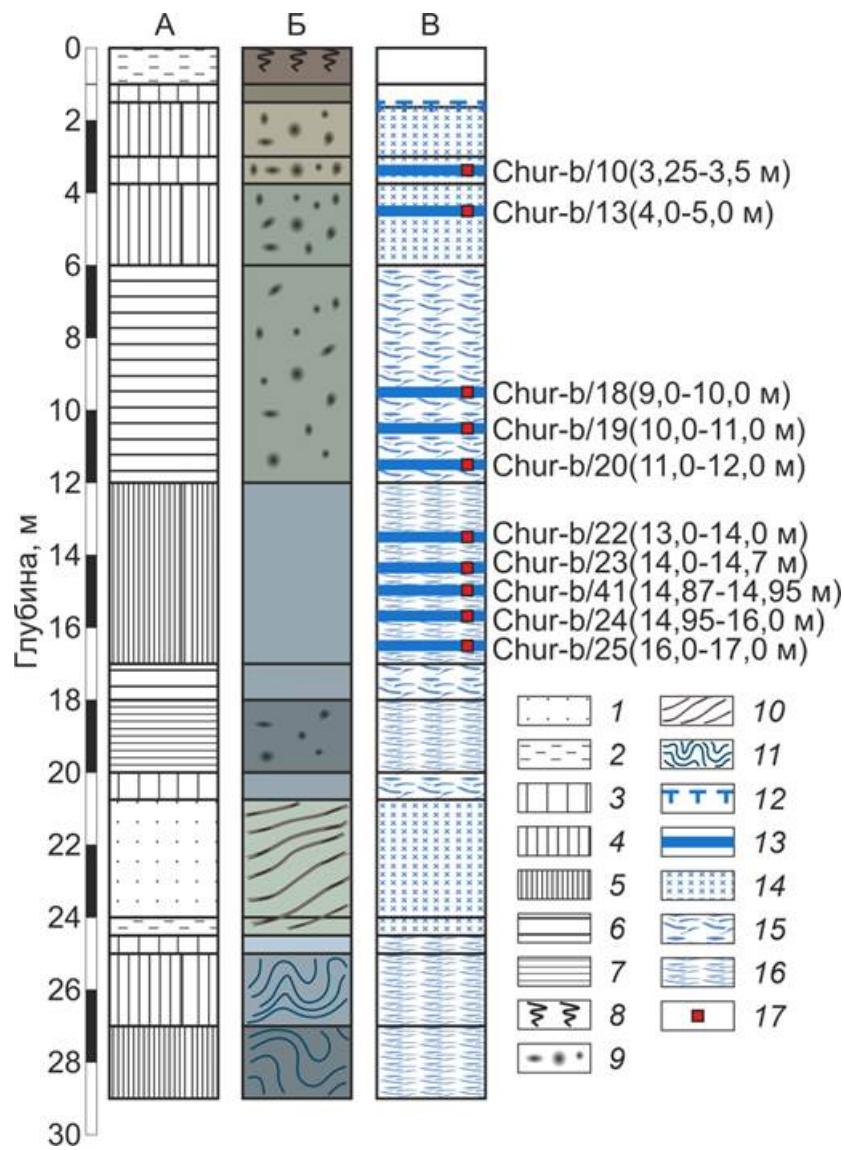


Рис. 5. Литологическая колонка (А), включения и новообразования (Б) и криолитологические особенности (В) отложений ледового комплекса, вскрытых глубокой скважиной в районе пос. Чурапча: 1 – песок, 2 – супесь, 3 – суглинок лёгкий, 4 – суглинок средний, 5 – суглинок тяжёлый, 6 – глина лёгкая, 7 – глина средняя, 8 – корневая система растений, 9 – железо-марганцевые конкреции и примазки, 10 – прослои органического вещества, 11 – криотурбации, 12 – подошва сезонноталого слоя, 13 – прослои льда, 14 – массивная криотекстура, 15 – крупношлировая криотекстура, 16 – мелкошлировая криотекстура, 17 – точки отбора проб льда для изотопного анализа.

Криолитологическое строение разреза

Мощность сезонноталого слоя по результатам бурения скважины составляет 1,5 м, ниже в супесчано-суглинистых слоях отложений низкой льдистости встречаются массивные криотекстуры. Ниже они сменяются на мелко-, а затем и на крупношлировые криотекстуры, приуроченные к более тяжёлым отложениям суглинистым и глинистым отложениям. Визуально льдистость суглинков и глин достигает 50–60%. Также в суглинистые и глинистые слои включены несколько высокольдистых прослоев, а также один слой практически чистого льда на глубинах 14,87–14,95 м (рис. 5, Б, В). В песчаных отложениях высокая льдистость наблюдается в прослоях органогенного материала. В нижней части разреза вертикальная слоистость нарушена многочисленными криотурбациями.

Скважиной глубиной 30 м вскрыты многолетнемёрзлые отложения, имеющие в основном тёмно-бурые и серые цвета окраски, в особенности сизовато-серые оттенки характерна для тяжёлых суглинков и глин. Сезонноталый слой имеет супесчаный состав, а ниже, на глубинах от 1,5 до 6,0 м отложения суглинистые. На глубинах 6,0 – 20,0 м наблюдается чередование слоёв суглинков и глин различной мощности, а ниже – резкая смена литологического состава на средний и мелкий песок (20,75 – 24,0 м), включающий большое количество слоёв органического вещества.

Распределение значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ по разрезу скважины

Распределение значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ изучено в текстурных льдах до глубины 17,7 м. В верхних 12 м (пачка 1) изотопный состав заметно отрицательнее: значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют от $-29,44$ до $-34,35\text{\textperthousand}$, а величины $\delta^2\text{H}$ – от $-213,5$ до $-253,6\text{\textperthousand}$. В интервале 12–17,7 м (пачка 2) значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют от $-25,94$ до $-28\text{\textperthousand}$, а величины $\delta^2\text{H}$ – от $-195,3$ до $-214,3\text{\textperthousand}$ (табл. 1, рис. 6).

Таблица 1. Изменение значений $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d_{exc} в текстурных льдах по разрезу глубокой скважины в районе пос. Чурапча

Полевой номер образца	Глубина, м	$\delta^{18}\text{O}$, \textperthousand	$\delta^2\text{H}$, \textperthousand	d_{exc} , \textperthousand
<i>Пачка 1. Супесь, суглинок легкий и средний с массивной, ниже крупношариковой криотекстурой (1,5-12,0 м)</i>				
Chur-23-b/07	1,5-2,0	-29,65	-213,5	23,7
Chur-23-b/10	3,25-3,5	-31,40	-229,9	21,3
Chur-23-b/13	4,0-5,0	-34,35	-253,6	21,2
Chur-23-b/18	9,0-10,0	-30,23	-228,0	13,8
Chur-23-b/19	10,0-11,0	-30,80	-228,5	17,9
Chur-23-b/20	11,0-12,0	-29,44	-217,4	18,1
<i>Пачка 2. Суглинок тяжелый с мелкошариковой криотекстурой (12,0-17,7 м)</i>				
Chur-23-b/22	13,0-14,0	-26,25	-195,3	14,7
Chur-23-b/23	14,0-14,7	-28,00	-214,3	9,7
Chur-23-b/41	14,87-14,45	-27,53	-212,3	7,94
Chur-23-b/24	14,95-16,0	-26,59	-206,4	6,32
Chur-23-b/25	16,0-17,7	-25,94	-200,3	7,22

В верхних 12 м (пачка 1) среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ составляет $-30,98\text{\textperthousand}$, а средняя величина $\delta^2\text{H}$ – $-228,5\text{\textperthousand}$, среднее значение d_{exc} – $19,3\text{\textperthousand}$. В интервале 12–17,7 м (пачка 2) среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ составляет $-26,86\text{\textperthousand}$, а средняя величина $\delta^2\text{H}$ – $-205,7\text{\textperthousand}$, среднее значение d_{exc} – $9,2\text{\textperthousand}$ (табл. 2).

Таблица 2. Минимальные (мин.), максимальные (макс.) и средние (сред.) значения $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d_{exc} в текстурных льдах двух изотопно контрастных пачек отложений по разрезу глубокой скважины в районе пос. Чурапча

$\delta^{18}\text{O}$, \textperthousand	$\delta^2\text{H}$, \textperthousand	d_{exc} , \textperthousand
---	--	--

$\delta^{18}\text{O}$, ‰			δ^{D} , ‰			δ^{excr} , ‰		
мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.
<i>Пачка 1. Супесь, суглинок легкий и средний с массивной, ниже крупношлировой криотекстурой (1,5-12,0 м)</i>								
-34,35	-30,98	-29,44	-253,6	-228,48	-213,5	13,8	19,3	23,7
<i>Пачка 2. Суглинок тяжелый с мелкошлировой криотекстурой (12,0-17,7 м)</i>								
-28,00	-26,86	-25,94	-214,3	-205,7	-195,3	6,32	9,2	14,7

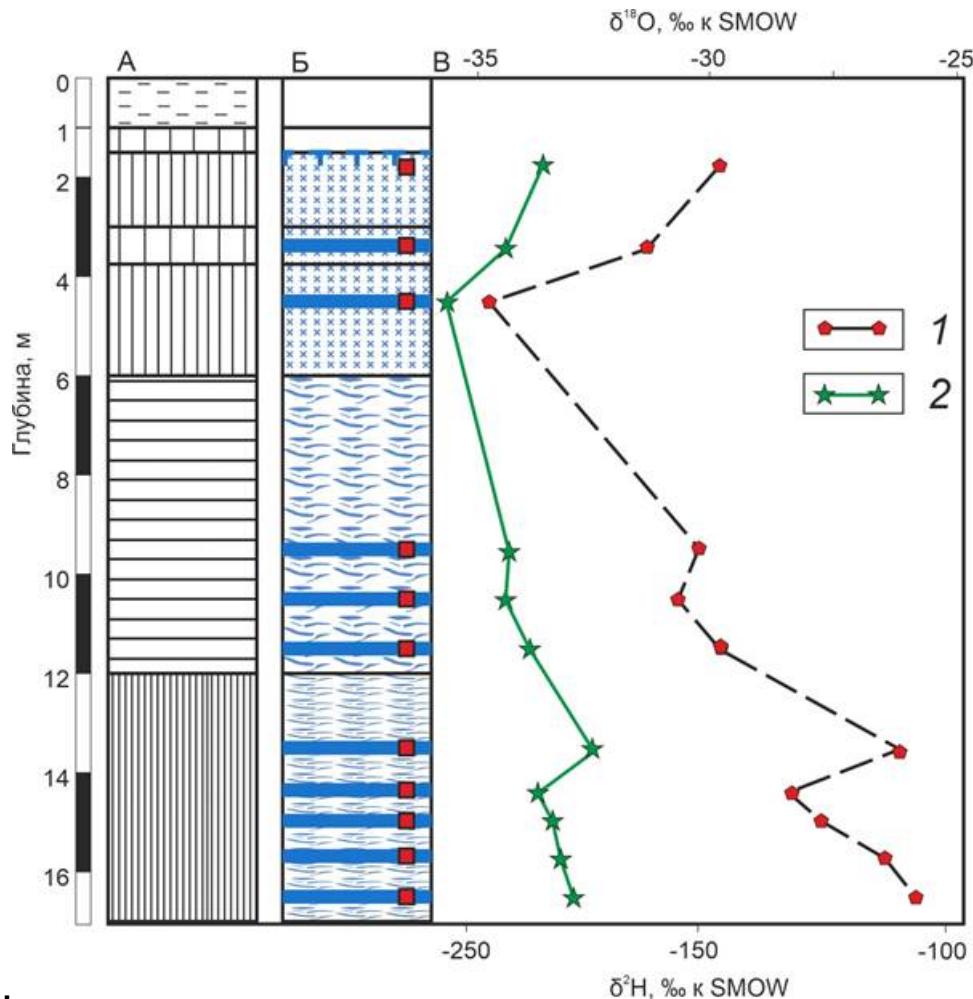


Рис. 6. Литологическая колонка (А), криолитологическое строение (Б) и распределение значений $\delta^{18}\text{O}$ (1) и δ^{D} (2) по разрезу, а также новообразования и многолетнемерзлых отложений (В), вскрытых глубокой скважиной в районе пос. Чурапча. Остальные условные обозначения см. рис. 5

Дискуссия

Многолетнемерзлые породы в районе пос. Чурапча характеризуются разнообразными морфологическими проявлениями. Одно из наиболее примечательных – это полигональные плоские бугры, образовавшиеся при эрозионной переработке полигонально-жильных структур на территории поселка и бывшего аэродрома (рис. 7).

Летом 2023 г. произошел размыт ядра булгунняха в Центральной Якутии близ с. Толон (Центральная Якутия), недалеко от пос. Чурапча (рис. 8). Булгуннях расположен в центральной части аласса и имеет вытянутую форму в виде «восьмерки», ориентированной на северо-запад. Разрушению с образованием озера диаметром около 35 м подверглась наиболее высокая и широкая часть булгунняха. Высота булгунняха составляет 13 м, длина в СЗ направлении – 130 м, в широкой разрушенной части – 76

м.^[17] Лед ядра булгунняха преимущественно чистый. Цвет льда белесый или голубоватый. Под подошвой покровного слоя на высоте 6 м относительно уровня воды озере лед ядра прозрачный.



Рис. 7. Плоскополигональный рельеф, образовавшийся при термоэрэзионной переработке повторно-жильных льдов в районе пос. Чурапча. Фото с сайта <https://theplanetpress.blogspot.com/>



Рис. 8. Вскрытие ядра булгунняха в Центральной Якутии близ с. Толон: а – внешний вид булгунняха, б – кратер с озером в центре бугра, в – лед по краям кратера, г – контакт разных типов льда. Фото с сайта <https://fishki.net/4473732-v-jakutii-iz-za-jerozii-pochvyna-poverhnosty-vystupila-vech.html>

Лед из ядер образован из воды промерзшего подозерного талика, когда льдообразование, скорее всего, происходило в условиях закрытой системы. Значение $\delta^{18}\text{O}$ во льду булгунняха составляет в среднем $-17,41\text{\textperthousand}$, величина $\delta^2\text{H} = -149,26\text{\textperthousand}$, и $0,9$ по $d_{\text{exc}} = -9,97\text{\textperthousand}$. Образец, отобранный на границе между голубоватым льдом ядра и белесым льдом, имеет более легкий изотопный состав: значение $\delta^{18}\text{O}$ равно $-24,07\text{\textperthousand}$, величина $\delta^2\text{H} = -191,73\text{\textperthousand}$, и $d_{\text{exc}} = 0,9\text{\textperthousand}$.^[17] Это заставляет думать о ином источнике воды для белесого льда.

Сопоставление изотопного состава льда ядра булгунняха и сегрегационного льда, вскрытого скважиной в районе пос.Чурапча, показало, что лед булгунняха заметно более изотопно тяжелый, а также характеризуется намного более низкими значениями δ_{D} (даже отрицательными), что показывает различие в условиях промерзания и формирования льда, а также в источниках воды: ядро булгунняха, наиболее вероятно, формировалось в условиях закрытой системы из воды подозерного талика. Эта вода могла представлять собой смесь осадков разных сезонов (талый снег и дожди) и подвергалась воздействию испарения в жаркие летние месяцы.

Вода для образования сегрегационного льда из скважины могла в большей степени формироваться из талого зимнего снега и меньше подвергаться испарению. Контрастные значения во льду двух изученных пачек может говорить как о различных источниках воды – для льда в пачке 1 источником воды могли быть в большей степени осадки зимнего сезона (поверхностные воды, формировавшиеся из талого снега), наличие отрицательного пика в распределении изотопных значений по вертикали в пачке 1 может говорить о двустороннем промерзании (сверху и снизу) и об изотопном фракционировании в процессе промерзания.

Отложения пачки 2 представлены тяжелыми суглинками, вероятно озерными, насыщение этих отложений могло происходить озерной водой, которая состояла из смеси осадков как зимнего, так и летнего сезона и характеризовалась более высокими значениями изотопного состава. Промерзание этих суглинков, скорее всего, судя по конфигурации изотопной диаграммы в самой нижней ее части (устойчивому тренду снижения значений $\delta^{18}\text{O}$ от $-24,8$ до $-28\text{\textperthousand}$ и величины $\delta^2\text{H}$ от $-200,3$ до $-214,3\text{\textperthousand}$ в интервале глубин от 17,7 до 14 м), происходило снизу-вверх и могло начаться уже при обмелении озера.

Наши данные по изотопному составу сегрегационного льда из скважины мы сопоставили с данными изотопного состава текстурных и пластовых льдов, исследованных в центральной и северной Якутии.

В.Б.Спектор с соавторами^[18] исследовали пластовый лед в скважине, пробуренной на Лено-Амгинском междуречье, примерно в 200 км западнее пос.Чурапча. В интервалах глубин 13,5-14,2 м и 23,3-24,5 м скважиной были вскрыты прослои льда. Значения $\delta^{18}\text{O}$ варьировали от $-29,2$ до $-32,3\text{\textperthousand}$, значения $\delta^2\text{H}$ от $-213,5$ до $-236,9\text{\textperthousand}$ в верхнем горизонте льда. В нижнем горизонте льда значения $\delta^{18}\text{O}$ варьировали от $-30,3$ до $-31,7\text{\textperthousand}$, значения $\delta^2\text{H}$ – от $-219,9$ до $-234,7\text{\textperthousand}$. Эти значения для пластового льда близки к значениям исследованного нами сегрегационного льда из пачки 1 (среднее значение $\delta^{18}\text{O} = -31\text{\textperthousand}$, среднее значение $\delta^2\text{H} = -228,5\text{\textperthousand}$, см. табл. 2). Согласно выводам В.Б.Спектора с соавторами^[18], исследованный ими пластовый лед имеет фирновое происхождение, т.к. по изотопному составу он близок к современному снегу и по соотношению $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ он близок к локальной линии метеорных вод.

По данным авторов^[19] текстурные льды в едомной толще разреза Зеленый Мыс (низовья р.Колымы) в интервале глубин от 11 до 33 м характеризовались значениями $\delta^{18}\text{O}$ от -27 до $-30,6\text{\textperthousand}$, в то время как по ледяным жилам получены более низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ (от $-29,1$ до $-34,1\text{\textperthousand}$). В текстурных льдах в едомной толще Плахинского Яра в низовьях р.Колымы значения $\delta^{18}\text{O}$ варьировали от -22 до $-33\text{\textperthousand}$, что также в целом ниже, чем в повторно-жильных льдах этого разреза (вариации $\delta^{18}\text{O}$ от $-29,9$ до $-34,7\text{\textperthousand}$).^[20]

Текстурный лед исследован в едомных озерных отложениях Центральной Якутии в районе Юкечи, на Лено-Алданском междуречье.^[4] Глубина скважины составила около 20 м. Показано, что лед характеризовался довольно низкими значениями изотопного состава (значения $\delta^{18}\text{O}$ варьировали от -27 до $-31\text{\textperthousand}$) и довольно высокими значениями δ_{excess} – в среднем около 15–17‰. Эти значения по текстурному льду сопоставимы со значениями изотопного состава повторно-жильных льдов стадии МИС-3, исследованных в других районах центральной Якутии и может свидетельствовать о большой роли изотопно легких зимних осадков в воде-источнике для текстурного льда в условиях экстремально холодного континентального климата во время МИС-3.^[4]

В районе Клондайка, Юкон, Канада, криостратиграфия была детально исследована в мерзлых отложениях, вскрытых в процессе горных работ^[21,22]. Изотопный состав текстурного льда определен в отложениях до глубины около 8 м. Показано различие в значениях в двух разных фациях (пачках). Лед нижней пачки характеризовался более низкими значениями изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$ от -32 до $-29\text{\textperthousand}$, $\delta^2\text{H}$ от -234 до $-257\text{\textperthousand}$), что, по мнению авторов, характеризует типично гляциальные климатические условия. Лед в верхней пачке изотопически более тяжелый (значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют от -28 до $-21\text{\textperthousand}$, значения $\delta^2\text{H}$ от -164 до $-225\text{\textperthousand}$), что, по заключению авторов, маркирует переход к более теплым и влажным условиям конца ледникового периода перед наступлением голоценовой эпохи, около 11,6 тыс. лет назад.^[21]

Эксперимент по исследованию изотопного состава воды и льдов в составе дисперсных грунтов показал, что при взаимодействии воды с грунтами, ее миграции и льдообразовании при промерзании происходит фракционирование изотопов, зависящее от состава грунта и условий промерзания.^[23] Вода, отжатая из дисперсных грунтов, изотопно тяжелее исходной воды, в среднем на 2–3‰ для значений $\delta^{18}\text{O}$. Это объясняется более активным взаимодействием грунта с более легкими изотопами воды, при этом было показано, что бентонит в силу своей большей адсорбционной способности взаимодействует несколько активнее, чем каолинит и пылеватый суглинок.

В диссертации Д.В.Михалева^[24] было показано, что изотопный состав текстурных льдов зависит от двух факторов: изотопного состава грунтовой влаги перед промерзанием и изотопного фракционирования в процессе промерзания.^[24] Чем медленнее происходит промерзание, тем в большей степени образующийся лед обогащается изотопами. При двустороннем промерзании (сверху и снизу) наиболее изотопно тяжелый лед образуется в верхнем и нижнем горизонтах промерзающего слоя, в то время как средний (иссущенный) горизонт характеризуется более низкими изотопными значениями образующегося льда. Такое распределение наблюдается во льду исследованной нами пачки 1, что позволяет сделать вывод о двустороннем промерзании этой пачки. По данным Д.В.Михалева^[24], для эпигенетического промерзания отложений характерно постепенное облегчение изотопного состава текстурного льда с глубиной, обусловленное изотопным фракционированием.

Анализ данных по изотопному составу текстурных льдов в едомных отложениях различных районов Якутии показал близкий диапазон значений со льдом пачки 1 из исследованной нами скважины в Чурапче. Более тяжелый изотопный состав льда пачки 2 вероятно, объясняется другим источником воды и влиянием изотопного фракционирования при взаимодействии глинистых частиц с водой. Также возможно, что промерзание суглинков пачки 2, судя по конфигурации изотопной диаграммы,

происходило снизу-вверх и могло начаться уже при обмелении озера.

Что касается контрастности изотопных характеристик льда пачки 1 и пачки 2, заметим, что подобное соотношение, когда в верхней пачке изотопный состав в среднем устойчиво на 3-5‰ ниже, чем в нижней пачке, встречается в ММП достаточно редко. Просмотрев десятки изотопных диаграмм по скважинам в ММП севера России, Аляски и Северной Канады, мы обнаружили лишь единичные примеры, где зафиксирована такая изотопная инверсия. Одним из наглядных примеров является изотопное распределение, полученное Ф.Майклом и П.Фритцем^[25] по скважине 79-8, расположенной вблизи морского побережья залива Маккензи, где до глубины 2,5-3,0 м значения $\delta^{18}\text{O}$ составляют $-18\text{--}20\text{\textperthousand}$, а ниже резко повышаются и в интервале 3,5-5,5 м постоянно выше $-14\text{\textperthousand}$.^[25] В этом случае контрастность изотопных соотношений верхней и нижней пачек, вероятно, может быть объяснена сменой фациального режима и преобладанием морского осадконакопления нижней пачки.

Бурение 30-метровой скважины с отбором керна в пос. Чурапча осуществлено в рамках реализации проекта Колымская мерзлотная трансекта – это проект организации участков мониторинга за температурой многолетнемёрзлых пород на метеостанциях вдоль федеральной автодороги «Колыма» на территории Республики Саха (Якутия). Сеть из семи скважин глубиной 30 метров, расположенных вблизи площадок продолжительного наблюдения за метеопараметрами, создаётся для определения реакции температурного режима мёрзлых пород при учёте максимально возможного количества климатических факторов. Создание «Колымской мерзлотной трансекты» предполагает бурение с отбором керна 30-метровых скважин на семи метеостанциях: Чурапча, Ытык-Кюель, Тёплый Ключ, Восточная, Агаякан, Томтор (Оймякон) и Делянкир.^[26]

В начале августа 2021 г. была пробурена скважина глубиной 15 м на метеостанции «Восточная». Время выстаивания скважины и восстановления температурного поля после бурения составило пять дней. После этого на протяжении трёх недель наблюдалось понижение температуры на глубинах 3, 5 и 15 м. Результаты контрольного замера, показывают распределение температуры пород в слое годовых теплооборотов на начало сентября. При отрицательной температуре пород перед зимним сезоном на глубине 3 м и положительной их температуре на глубине 1 м можно предположить, что мощность слоя сезонного протаивания пород составила 1,5-1,6 м. Наиболее низкой температурой (около $-6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) характеризуются горные породы в интервале глубин от 10 до 15 м.

Геологоразведочная скважина на рудопроявлении «Лазурное», расположенном в 60 км на юго-запад, является ближайшим участком проведения глубинных геотермических измерений, которые позволили определить мощность многолетнемёрзлой толщи в данном районе (210 м). Установленная для региона величина внутриземного теплового потока варьирует в пределах 75-85 мВт/м². Мощность многолетнемёрзлой толщи на метеостанции «Восточная» при допущении стационарного распределения температуры пород ниже слоя годовых колебаний составляет 310-320 м.^[26]

Дальнейшая реализация проекта «Колымская мерзлотная трансекта» позволит определить температурные и теплофизические параметры мёрзлых горных пород в семи различных регионах Якутии и дополнит ранее полученные^[27,28] материалы по геокриологии крупнейших мезозойских депрессий Якутии. А изучение изотопных характеристик текстурного льда позволит оценить характер промерзания, выделить несомненно синкриогенные толщи и отделить их от возможно эпикриогенных.

Заключение

Скважиной глубиной 30 м вскрыты многолетнемёрзлые отложения, имеющие в основном тёмно-бурые и серые цвета окраски, в особенности сизовато-серые оттенки характерны для тяжёлых суглинков и глин. Сезонноталый слой имеет супесчаный состав, а ниже, на глубинах от 1,5 до 6,0 м отложения суглинистые. На глубинах 6,0–20,0 м наблюдается чередования слоёв суглинков и глин различной мощности, а ниже – резкая смена литологического состава на средний и мелкий песок (20,75–24,0 м), включающий большое количество слоёв органического вещества.

Распределение значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ изучено в текстурных льдах до глубины 17,7 м. В верхних 12 м изотопный состав заметно отрицательнее: значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют от $-29,44$ до $-34,35\text{\textperthousand}$, а величины $\delta^2\text{H}$ – от $-213,5$ до $-253,6\text{\textperthousand}$. В интервале 12–17,7 м значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют от $-25,94$ до $-28\text{\textperthousand}$, а величины $\delta^2\text{H}$ – от $-195,3$ до $-214,3\text{\textperthousand}$.

Анализ данных по изотопному составу текстурных льдов в едомных отложениях Якутии показал близкий диапазон значений со льдом пачки 1 из исследованной нами скважины в Чурапче. Более тяжелый изотопный состав льда пачки 2 вероятно, объясняется другим источником воды и влиянием изотопного фракционирования при взаимодействии глинистых частиц с водой.

Что касается контрастности изотопных характеристик пачки 1 и пачки 2, заметим, что подобное соотношение, когда в верхней пачке изотопный состав в среднем устойчиво на 3-5% ниже, чем в нижней пачке, встречается в позднеплейстоценовых ММП достаточно редко.

Вода для образования сегрегационного льда из скважины могла в большей степени формироваться из талого зимнего снега и меньше подвергаться испарению. Контрастные значения во льду двух изученных пачек может говорить о различных источниках воды – для льда в пачке 1 источником воды могли быть в большей степени осадки зимнего сезона (поверхностные воды, формировавшиеся из талого снега), наличие отрицательного пика в распределении изотопных значений по вертикали может говорить о двустороннем промерзании (сверху и снизу) и об изотопном фракционировании в процессе промерзания.

Отложения пачки 2 представлены тяжелыми суглинками, вероятно озерными. Можно предположить, что насыщение этих отложений происходило озерной водой, которая состояла из смеси осадков как зимнего, так и летнего сезона и характеризовалась более высокими значениями изотопного состава.

Во всяком случае, пока вероятным объяснением более тяжелого изотопного состава пачки 2 является изотопное фракционирование в воде при взаимодействии с глинистыми частицами и, возможно, другой источник воды, чем в пачке 1. Промерзание суглинков пачки 2, судя по конфигурации изотопной диаграммы, скорее всего происходило снизу-вверх и могло начаться уже при обмелении озера.

Благодарности

Авторы выражают благодарность институту мерзлотоведения СО РАН за организацию летней полевой школы-семинара «Криогенные процессы Центральной Якутии», в ходе которой были проведены полевые работы, а также сотрудникам института В.В. Огонерову, Н.Е. Баишеву и Н.И. Тананаеву за помощь в сборе и транспортировке

образцов.

Библиография

1. Железняк М.Н. *Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы*. Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Якутск: ИМ СО РАН. 2002. 337 с.
2. Сысолятин Р.Г. *Геокриологические условия мезозойских впадин Алданского щита*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Якутск: ИМ СО РАН. 2023. 185 с.
3. Атлас Якутской АССР. М.: ГУГК Сов. Мин. СССР, 1981. 40 с.
4. Ulrich M., Jongejans L.L., Grosse G. et al. Geochemistry and Weathering Indices of Yedoma and Alas Deposits beneath Thermokarst Lakes in Central Yakutia // *Front. Earth Sci.*, 2021. 9:704141. URL: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.704141>
5. Башарин Н.И., Егорова Л.С., Васильев Н.А., Фёдоров Н.А., Фёдоров А.Н. Применение беспилотных летательных аппаратов для оценки активизации термокарста // *Вестн. СВФУ. Сер. «Науки о Земле»*. 2020. №3 (19). С. 36–44.
URL: <https://doi.org/10.25587/SVFU.2020.19.3.005>
6. Lijima Y., Abe T., Saito H. et al. Thermokarst Landscape Development Detected by Multiple-Geospatial Data in Churapcha, Eastern Siberia // *Front. Earth Sci.* 2021. 9:750298. URL: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.750298>
7. Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 414 с.
8. Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). М-6 1:1 500 000 / Федоров А.Н., Торговкин Я.И., Шестакова А.А. и др.; Гл. ред. М.Н. Железняк. Якутск: ИМЗ СО РАН. 2018.
9. Lijima Y., Park H., Konstantinov P.Ya. et al. Active-Layer Thickness Measurements Using a Handheld Penetrometer at Boreal and Tundra Sites in Eastern Siberia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2016. 8 p. URL: <https://doi.org/10.1002/ppp.1908>
10. Desyatkin R., Filippov N., Desyatkin A. et al. Degradation of Arable Soils in Central Yakutia: Negative Consequences of Global Warming for Yedoma Landscapes // *Front. Earth Sci.* 2021. 9:683730. URL: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.683730>
11. Чжан Т.Р., Иванова Н.А. Мерзлотно-грунтовые условия участка реконструкции автомобильной дороги Чурапча – Арылах // Матер. IX Всеросс. научн.-практ. конф. «Геология и минеральные ресурсы Северо-Востока Россия» (г. Якутск, 10 – 12 апреля 2019 г.). – Якутск: Изд. Дом СВФУ. 2019. Т. 2. 324 с.
12. Горохов А.Н., Федоров А.Н., Скорве Дж., Макаров В.С. Оценка антропогенной изменчивости ландшафтов окрестностей с. Чурапча (Центральная Якутия) на основе данных дистанционного зондирования Земли // *Эволюция и динамика геосистем*. 2011. № 4. С. 7–13.
13. URL: http://www.pogodaiklimat.ru/history/24768_2.htm (дата обращения 17.06.2024)
14. Десяткин Р.В. *Почвообразование в термокарстовых котловинах – аласах криолитозоны* / Автореф. ... дис. докт. биол. наук. Улан-Удэ: ИОЭБ СО РАН, 2006. 48 с.
15. Классификация и диагностика почв СССР / Егоров В.В., Фридланд В.М., Иванова Е.Н. и др. – М.: Колос, 1977.
16. *Cryosols in Perspective: A View from the Permafrost Heartland. Guidebook-monograph for Field Excursions of the VII Int. Conf. on Cryopedology* / Ed. S.V. Goryachkin, D.E. Konyushkov. Moscow-Yakutsk, 2017. 82 p.
17. Сивцев Д. Е., Платонов И. А., Торговкин Н. В. Результаты исследования разрушенного булгунняха в Чурапчинском районе (Центральная Якутия): строение и геохимия // Сборник материалов XV всероссийской молодежной научной школы-конференции «Меридиан» Учебный центр НИУ ВШЭ «Вороново» 8–11 ноября 2023 г. М.:

- Ин-т географии РАН. 2023. С. 210–216.
18. Спектор В.Б., Спектор В.В., Бакулина Н.Т. Погребенные снежники на Лено-Амгинской равнине // *Криосфера Земли*. 2011. Том XV. № 4. С. 18–24.
19. Vasil'chuk Yu. K., Vasilchuk A.C. 2021. Air January paleotemperature reconstruction 48–15 calibrated ka BP using oxygen isotope ratios from Zelyony Mys yedoma // *Earth's Cryosphere*. 2021. Vol. XXV. N2. P. 44–55. doi: 10.15372/KZ20210205
20. Vasil'chuk Yu.K ., Vasil'chuk A.C. 2018. Winter Air Paleotemperatures at 30–12 Kyr BP in the Lower Kolyma River, Plakhinskii Yar yedoma: Evidence from Stable Isotopes // *Earth's Cryosphere*. Vol. XXII. No. 5. P. 3–16. doi: 10.21782/EC2541-9994-2018-5(3-16).
21. Kotler E., Burn C.R. Cryostratigraphy of the Klondike "muck" deposits, west-central Yukon Territory // *Canadian Journal of Earth Sciences*. 2000. Vol. 37(6). P. 849–861.
22. Kotler E. *The cryostratigraphic and isotopic characteristics of "muck" deposits, Klondike area, Yukon Territory*. A thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. Carleton University. Ottawa, Ontario. 1998. 115 p.
23. Konishchev V.N., Golubev V.N., Rogov V.V., Sokratov S.A., Tokarev I.V. Experimental study of the isotopic fractionation of water in the process of ice segregation. *Earth's Cryosphere*. 2014. № 3. С. 3–10.
24. Михалев Д.В. Изотопно-кислородный анализ текстурообразующих льдов (на примере Колымской низменности и Енисейского Севера). Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. М.: Моск. ун-т. 1990. 24 с.
25. Michel F.A., Fritz P. Significance of isotope variations in permafrost waters at Illisarvik, N.W.T. // *Permafrost. Proceedings of the Fourth Canadian Permafrost Conference*. French H.M. (ed.). Calgary: National Research Council of Canada. 1982. P. 173–181.
26. Сысолятин Р. Г., Калиничева С. В., Литовко А. В., Фёдоров А. Н., Рожина М. С., Сивцев М. А. Колымская мерзлотная трансекта (первые результаты) // Наука и техника в Якутии. 2022. № 2(43). С. 28–32. doi: 10.24412/1728-516X-2022-2-28-32.
27. Сысолятин Р.Г., Железняк М.Н. Термический режим криолитозоны Ытымджинской впадины Алданского щита // *Криосфера Земли*. 2021. Том XXV(6). С. 28–40. doi: 10.15372/KZ20210603.
28. Сысолятин Р.Г., Железняк М.Н. Геокриологические условия Токариканского и Гувилгринского грабенов (Южная Якутия) // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023. Том 28(2). С. 261–274. doi: 10.31242/2618-9712-2023-28-2-261-274.

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, обследование и анализ дефектов криолитологического строения и распределения стабильных изотопов кислорода и водорода в разрезе плейстоценовых отложений, вскрытых глубокой скважиной в пос. Чурапча, Лено-Алданское междуречье.

Методология исследования исходя из анализа статьи можно сделать вывод о использовании авторами в ходе полевых работ метода исследования керна многолетнемерзлых отложений, в том числе, ледовый комплекс (едома), вскрытые глубокой буровой скважиной. Бурение выполнялось вертикально с помощью крупногабаритной буровой установки ПБУ-2 на базе грузового автомобиля КАМАЗ. Использовалась колонковая буровая труба диаметром 146 мм. В выбуренных кернах в полевых условиях были произведены описания литологического состава и криотекстур,

описание цвета, структуры, пластиность, грунтовые и ледяные включения, характеристика криотекстур. Предварительная обработка образца включала полное его оттаивание при комнатной температуре без доступа солнечного света и переливание в пластиковые матовые флаконы объёмом 30 мл с герметичной крышкой. 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 с использованием следующих международных стандартов: V-SMOW-2, GISP, SLAP, USGS-45 и USGS-46. Погрешность определений составила: для $\delta^{18}\text{O}$ – $\pm 0,02\text{ ‰}$, для $\delta^2\text{H}$ – $\pm 0,3\text{ ‰}$. Всего проанализировано 11 проб текстурных льдов. Автором также использовался метод литературного анализа, сравнительных характеристик географических объектов и процессов, метод построения диаграмм.

Актуальность затронутой темы связано с тем, что в исследовании криолитозоны Сибирской платформы накоплен обширный материал о многолетнемерзлых породах (ММП), позволяющий охарактеризовать их современное термодинамическое состояние, найти количественные зависимости температуры и мощности ММП от комплекса природных факторов и выполнения палеореконструкции динамики ММП и достоверного прогноза геокриологических условий при освоении территории. Исследования автора статьи помогают понять механизм природопользования в холодном российском климате в последние десятилетия и дает возможность проанализировать пригодность системы и ее компонентов.

Научная новизна заключается в попытке автора статьи на основе проведенных исследований и анализа данных по изотопному составу текстурных льдов в едомных отложениях Якутии показал близкий диапазон значений со льдом из исследованной скважины в Чурапче. Более тяжелый изотопный состав льда объясняется другим источником воды и влиянием изотопного фракционирования при взаимодействии глинистых частиц с водой. Вода для образования сегрегационного льда из скважины могла в большей степени формироваться из талого зимнего снега и меньше подвергаться испарению. Контрастные значения во льду двух изученных пачек может говорить как о различных источниках воды.

Стиль, структура, содержание стиля изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим процесс. Таблицы, фотографии и схемы, и графики иллюстративны,

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на нормативно-правовые акты.

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.