



THE ORIGIN OF ICE MOUNDS NEAR THE ERKATA-YAKHA RIVER, YAMAL PENINSULA, FROM THE RELATIONSHIP BETWEEN ΔD AND $\Delta^{18}O$ ISOTOPE RATIOS

O.S. Gutareva ¹, E.V. Ivanov ², I.V. Buddo ^{1,3,4}, A.M. Kononov ^{1,3}, N.V. Misyurkeeva ^{1,4},
I.A. Shelokhov ^{1,3,4}, A.N. Shein ⁴, G.N. Kraev ⁵, A.S. Smirnov ⁴

¹ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

² Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1a Favorsky St, Irkutsk 664033, Russia

³ Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St, Irkutsk 664074, Russia

⁴ Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District, 20 Republic St, Salekhard 629007, Russia

⁵ Higher School of Economics, 11 Pokrovsky Blvd, Moscow 109028, Russia

ABSTRACT. Ice mounds are widespread cryogenic landforms that occur during freezing of water-saturated sediments and in ice segregation or ice injection with the formation of ice cores. Complex mechanisms of occurrence of these landforms have their own characteristics depending on the type of enclosing sediments, water and gas saturation, freezing rate, and other factors. Ice formation processes are often accompanied by explosions of the central part with the occurrence of negative landforms. In response to the widespread occurrence of perennially frozen gas-saturated rocks, these processes are accompanied by gas emissions, gas inflammation, and other, less intense gas shows. It is quite difficult in these conditions to determine the causes of the catastrophic phenomenon, to reconstruct the dynamics of the process, and to understand the role of gas-saturated fluids. In this paper, an attempt has been made to determine the ice formation conditions using isotopic techniques. The isotopic composition of ice can reflect the conditions of ice formation at the time of occurrence of ice mounds and its related possibility of participation of gas-saturated fluids from deep-lying gas-bearing horizons [Buddo et al., 2023, 2024]. The composition of stable isotopes δD and $\delta^{18}O$ was determined for three ice mounds in the south of the Yamal Peninsula, where there were catastrophic explosions of ice mounds with the formation of large craters. The results of the study made it possible to reconstruct the conditions of ice mound occurrence and to determine different ice formation modes.

KEYWORDS: ice mounds; isotopes of oxygen and hydrogen; stable isotopes; West Siberia; Yamal; Yerkata-Yakha; Arctic

FUNDING: The study was funded by grant 22-17-20009 from the Russian Science Foundation (<https://rscf.ru/project/22-17-200090/>, accessed on 6 August 2024). The study, 22-17-20009, was supported by the government of the Yamal-Nenets Autonomous District.



EDN: NVREKB

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Oxana S. Gutareva, oxanagutareva@gmail.com

Received: October 15, 2023

Revised: December 5, 2023

Accepted: December 11, 2023

FOR CITATION: Gutareva O.S., Ivanov E.V., Buddo I.V., Kononov A.M., Misyurkeeva N.V., Shelokhov I.A., Shein A.N., Kraev G.N., Smirnov A.S., 2024. The Origin of Ice Mounds near the Erkata-Yakha River, Yamal Peninsula, From the Relationship Between ΔD and $\Delta^{18}O$ Isotope Ratios. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (6), 0800. doi:10.5800/GT-2024-15-6-0800

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЛЬДОВ БУГРОВ ПУЧЕНИЯ В РАЙОНЕ РЕКИ ЕРКАТА-ЯХА (П-ОВ ЯМАЛ) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗОТОПНЫХ СООТНОШЕНИЙ δD И $\delta^{18}O$

О.С. Гутарева¹, Е.В. Иванов², И.В. Буддо^{1,3,4}, А.М. Кононов^{1,3}, Н.В. Мисюркеева^{1,4},
И.А. Шелохов^{1,3,4}, А.Н. Шеин⁴, Г.Н. Краев⁵, А.С. Смирнов⁴

¹ Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

² Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

⁴ Научный центр изучения Арктики, 629007, Салехард, ул. Республики, 20, Россия

⁵ Высшая школа экономики, 109028, Москва, Покровский б-р, 11, Россия

АННОТАЦИЯ. Бугры пучения – широко распространенные криогенные формы рельефа, возникающие в ходе промерзания водонасыщенных отложений и сегрегационного или инъекционного льдообразования с формированием ледяных ядер. Сложные механизмы образования этих форм имеют свои особенности в зависимости от типа вмещающих отложений, водо- и газонасыщенности, скорости промерзания и других факторов. Часто процессы льдообразования сопровождаются взрывами центральной части с образованием отрицательных форм рельефа. В условиях распространения газонасыщенных многолетнемерзлых пород эти процессы сопровождаются газовыми выбросами, возгоранием газа и иными, менее интенсивными, газопроявлениями. В этих условиях достаточно сложно определить причины возникновения катастрофического явления, реконструировать динамику развития процесса и определить роль газонасыщенных флюидов. В данной работе предпринята попытка определения условий образования льда с помощью изотопных методов исследования. Изотопный состав льда может отражать условия льдообразования на момент формирования бугров пучения и возможность участия на этом этапе газонасыщенных флюидов из глубокозалегающих газоносных горизонтов [Buddo et al., 2023, 2024]. Состав стабильных изотопов δD и $\delta^{18}O$ определен для трех бугров пучения на юге п-ова Ямал, где проявлялись катастрофические взрывы бугров пучения с формированием крупных воронок. Результаты исследования позволили реконструировать условия формирования бугров пучения и определить различные режимы льдообразования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бугры пучения; изотопы кислорода и водорода; стабильные изотопы; Западная Сибирь; Ямал; Ерката-Яха; Арктика

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (№ 22-17-20009, <https://rscf.ru/project/22-17-20009/>). Проект № 22-17-20009 «Современные методы геофизических исследований для разработки и научного обоснования подходов к изучению внутреннего строения криолитозоны и поверхностных криогенных форм рельефа Арктики и их возможной связи с флюидодинамическими процессами» реализуется при поддержке правительства Ямало-Ненецкого автономного округа.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия повысилось внимание исследователей к буграм пучения, большой интерес представляют случаи и последствия взрывов бугров пучения на территории Ямало-Ненецкого автономного округа [Schurmeier et al., 2023; Khimenkov, Stanilovskaya, 2022]. Увеличение частоты взрывов исследователи связывают с деградацией многолетнемерзлых пород в результате глобальных климатических изменений, и в перспективе это может быть актуально для обширных областей криолитозоны в других районах [Leibman et al., 2018; Chuvilin et al., 2020; Zolkos et al., 2021; Vorobyev et al., 2019].

Изучение строения бугров пучения в данном регионе показало наличие таликов с высокой концентрацией газа как в самих таликах, так и в подстилающих бугры пучения толщах горных пород [Bogoyavlensky et al., 2020; Chuvilin et al., 2020; Kraev et al., 2019, 2022]. Это

позволяет предположить, что существуют механизмы поступления газа из недр по зонам тектонических нарушений. Во множестве озер в форме кратеров или воронок наблюдается газовыделение через разломы и трещины на их дне [Bogoyavlensky et al., 2020; Kraev et al., 2019, 2022]. Данные электроразведки и сейсморазведки показывают существование под буграми пучения субвертикальных аномалий физических полей (удельного электрического сопротивления и продольной скорости сейсмических волн), которые могут интерпретироваться как флюидопроницаемые зоны трещиноватости горных пород [Olenchenko et al., 2015; Misyurkееva et al., 2022].

Цель настоящей работы – на основе данных по содержанию стабильных изотопов кислорода и водорода в расплавах льдов и реконструкции режимов осадконакопления определить условия формирования льда в буграх пучения в районе р. Ерката-Яха.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

2.1. Объекты исследования

Район исследования представляет интерес из-за большой концентрации бугров пучения [Badu, Nikitin, 2020], расположенных на различных морфологических уровнях, имеющих многообразие форм рельефа.

Исследуемая территория расположена в Западной Сибири, на Ямальной низменности, в южной части п-ва Ямал в нижнем течении р. Ерката-Яха (рис. 1) с абсолютными отметками от 2 до 15 м. Согласно климатической классификации Кёппена-Гейгера [Beck et al., 2018], климат территории субарктический с температурой января порядка -20°C с равномерным распределением осадков в течение года от 20 мм зимой до 40–50 мм летом. Стандартные нормы годовой суммы осадков составляют 300–400 мм, 50–60 % которых выпадает в виде снега. Период с отрицательными значениями температуры воздуха длится восемь месяцев.

В соответствии с мерзлотным районированием [Trofimov et al., 1987] исследуемая территория относится к Байдарацко-Юрибейской геокриологической области и находится в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород со средней мощностью 150–250 м и температурой от -2°C в поймах рек до -8°C на высоких водоразделах. Глубина сезонного оттаивания составляет 0.8–1.0 м. В 2017–2021 гг. средняя глубина сезонного оттаивания увеличивалась со скоростью около 4 см/год [Circumpolar..., 2021]. Начиная с 1970 г. температура воздуха в Арктике повышается примерно на 1°C в десять лет [Stocker et al., 2013]. В среднем по региону температура воздуха за это время повысилась примерно на 2.8°C .

На большей части территории водоразделы представлены с поверхности льдистыми морскими отложениями казанцевского времени, которые промерзали эпигенетически во время завершения трансгрессии моря около 70000 л. н. [Astakhov, 2004]. Изредка встречаются останцы салехардской среднеплейстоценовой равнины. По мере дальнейшего отступления моря на протяжении всего неоплейстоцена сформировалась серия из трех морских и лагунно-морских террас (III – зырянского времени (начало неоплейстоцена), II – каргинского (30–24 тыс. л. н.), I – сартанского (20–13 тыс. л. н.), лайды и поймы (голоцен) суглинистых озерных и речных террас, сложенных синкриогенными толщами с преимущественно песчаным составом вплоть до настоящего времени [State Geological Map..., 2015].

Постоянно холодные условия, в том числе в периоды, традиционно рассматриваемые как межледниковья, вызвали формирование и современное широкое распространение подземных льдов различных генетических типов: инъекционно-сегрегационные ядра сезонных и многолетних бугров пучения, син- и эпигенетических полигонально-жильных льдов и пластовых залежей и погребенных льдов.

2.2. Изучение строения бугров и отбор образцов

Закартированные бугры пучения [Badu, Nikitin, 2020] в окрестностях научно-исследовательского стационара «Еркута» Российского центра освоения Арктики (РЦОА) классифицированы по гипсометрическому положению, отношению длины к ширине, морфологической структуре, на которой они находились, удаленности от стационара. Положение скважин выбиралось

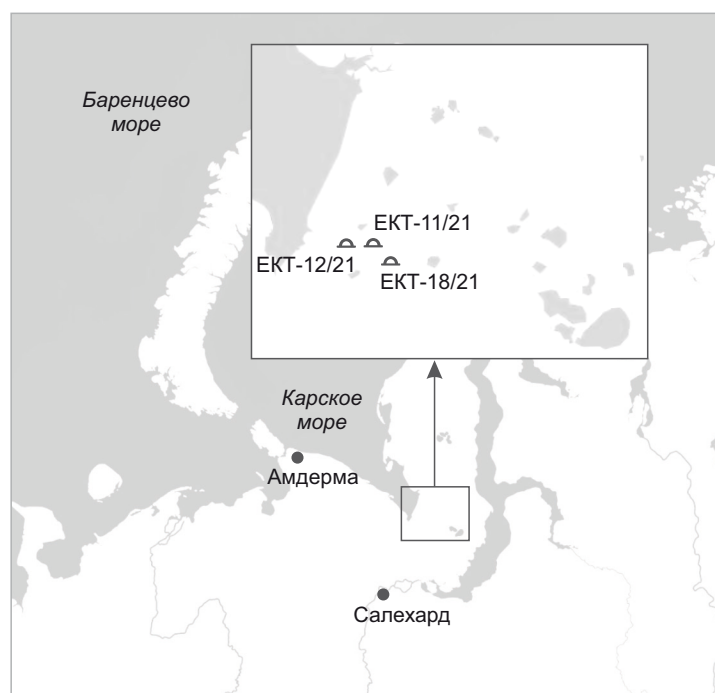


Рис. 1. Схема района исследований (юг п-ова Ямал).

Fig. 1. Study area (south of the Yamal Peninsula).

по карте бугров пучения, наложенной на геоморфологическую карту 1:200000. Высота бугров пучения сверялась по программе ArcticDEM. ArcticDEM – это цифровая модель поверхности Арктики с высоким разрешением, созданная Полярным геопространственным центром (Polar Geospatial Center, PGC) Университета Миннесоты на основе оптических стереоизображений, полученных с помощью WorldView-1, WorldView-2, WorldView, Спутники-3 и GeoEye-1 с использованием фотограмметрических методов [Porter et al., 2018]. Приоритетными объектами исследования выделены бугры пучения, расположенные на максимально разнообразных поверхностях, преимущественно вытянутой формы (с максимальным отношением длины к ширине), наибольшей высоты, и приближенные к стационару.

Наибольший интерес представляли бугры, в которых ранее были выявлены признаки наличия талых горизонтов. По результатам наземных сейсмических исследований выбрано три бугра пучения для более детального изучения, проведения буровых работ, описания и отбора образцов, аналитических и изотопных исследований.

В привершинных частях бугров пучения станком УКБ-12/25 колонковым снарядом вращательным способом пробурены скважины ЕКТ-11/21, ЕКТ-12/21 и ЕКТ-18/21 глубиной до 10–12 м. В ходе бурения промывочные жидкости не использовались. Диаметр бурения составлял от 112 до 76 мм, снижаясь по мере увеличения глубины. Проходка проводилась укороченными рейсами по 30–50 см, в зависимости от типа грунта и размеров керноприемника. Извлечение керна из керноприемника проводилось механически.

Скважина ЕКТ-11/21 пробурена в бугре пучения длиной в основании 115 м, шириной 65 м, абсолютная высота 10 м, относительная высота 4 м. Бугор расположен на первой озерно-аллювиальной террасе, которая широко распространена в котловинах крупных озер на всех геоморфологических ступенях [State Geological Map..., 2015]. Террасу слагают озерно-болотные образования – торф, илы, глины, алевроиты и пески, мощностью более 5 м. Обилие остатков растительности указывает на формирование основной части разреза в климатический оптимум голоцена.

Скважина ЕКТ-12/21 пробурена в средней части склона бугра пучения, одна из сторон которого была разрушена примерно в 1985 г. (согласно космоснимкам), и подмывается озером. Длина бугра в основании 80 м, ширина 70 м, абсолютная высота 10 м, относительная высота 6 м. Бугор сформирован в аллювиальных отложениях пойменного комплекса голоценовых террас, характеризующихся накоплением светло-серых и серых хорошо отсортированных тонко- и среднезернистых песков, алевроитов, глин и суглинков [State Geological Map..., 2015]. Мощность отложений до 3–5 м. Пойменный комплекс террас имеет широкое распространение в долинах рек района. Широко развиты полигональные тундры и термокарстовые озера, связанные с полигонами. Керн состоит из чередования мелких пыле-

ватых песков, супесей, прозрачного и молочно-белого льда с многочисленными пузырьками газов.

Скважина ЕКТ-18/21 пробурена на останце пойменной террасы р. Томбой-сё, абсолютной высотой 14 м, относительной высотой 3 м. Отложения террасы представлены светло-серыми и серыми хорошо сортированными тонко- и среднезернистыми песками, алевроитами и глинами. Керн состоит из чередования мелких пылеватых песков и супесей. Верхняя часть разреза представляет из себя лед с включениями супеси.

Проводилось изучение минеральных частиц под микроскопом, определялся размер и форма зерен, соотношение различных фракций с заданными физическими свойствами [Shvanov, 1987; Yapaskurt, 2008].

2.3. Изотопный анализ кислорода и водорода расплавов льдов бугров пучения

Для проведения изотопных исследований были предусмотрены особые условия отбора и транспортировки материалов. Мерзлый керн ненарушенного сложения доставлялся в контейнере с постоянной отрицательной температурой в ЦКП «Геодинамика и геохронология», г. Иркутск. В лабораторных условиях керн распиливался вертикально на две равные части. На основании различий литологии и криотекстуры образцов грунта были выделены интервалы, из которых отбирались пробы ледяных шпиров размером от 3 мм. Отобранные образцы оттаивали при комнатной температуре в закрытых условиях. Из грунтовых проб вода выделялась способом отстаивания. При недостаточной очистке пробы во время отстаивания использовалась центрифуга. Предварительно проведены тесты на образцах по влиянию центрифугирования проб на изотопный состав в связи с возможным влиянием поровых вод в составе глинистых минералов. Сравнивался изотопный состав нецентрифугированных проб и проб, побывавших в центрифуге единожды и дважды при оборотах центрифуги от 6000 до 8000 в минуту. Результаты исследования показали, что использование центрифуги в процессе пробоподготовки не влияет на их изотопный состав. Отклонение значений $\delta^{18}\text{O}$ и δD при измерениях не превышало пределов погрешности метода измерения.

Из 16 кернов, содержащих лед и льдонасыщенные пески, супеси и суглинки, получено 56 водных проб. Из девяти интервалов керна скважины ЕКТ-12/21 выделить водную пробу не удалось из-за малого влагосодержания.

Изотопный состав $\delta^{18}\text{O}$ и δD измерялся с помощью анализатора WS-CRDS Picarro L2140-i (<https://www.picarro.com/company/technology/crds>, Picarro, USA) по методике, разработанной в Арктическом и антарктическом НИИ, г. Санкт-Петербург [Ekaikin, 2016]. Полученные значения обозначаются как отношения в промилле (‰) к Венскому стандарту среднего значения океанической воды (Vienna Standard Mean Oceanic Water – VSMOW). Погрешность измерений составляет для $\delta^{18}\text{O}$ не более 0.05 ‰, для δD – не более 0.9 ‰.

Изотопный состав образцов льда сравнивался с глобальной линией метеорных вод (GMWL), которая описывается уравнением регрессии $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ [Craig, 1961]. Отклонение полученных точек $\delta^{18}O$ и δD от GMWL оценивается по величине избытка дейтерия (d-excess) и рассчитывается как $d = \delta D - 8\delta^{18}O$ [Dansgaard, 1964].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Характер распределения минеральных частиц в пробах

С целью изучения условий формирования отложений, слагающих бугор пучения, под микроскопом определялся размер и форма зерен, соотношение различных фракций с заданными физическими свойствами. Выявлены характерные для разрезов подобного типа параметры минеральных частиц (степень окатанности, раковистый излом, параллельная штриховка, характер распределения).

При анализе обозначенных параметров по скважине ЕКТ-12 наблюдается тенденция, которая прослежи-

вается сверху вниз, – это практически исчезновение частиц с раковистым изломом к нижней части скважины, что говорит об изменении источников поступления кластического (обломочного) материала. Частицы с раковистым изломом, по-видимому, поступали из относительно недалеких источников, поскольку остальной материал имеет параллельную штриховку (серия параллельных, в зависимости от угла скола, царапин), свидетельствующую о механической обработке, связанной с мерзлотными процессами [Mahaney, 2002].

По степени окатанности материала также выделяется одна определенная для всего материала тенденция. Чем крупнее зерно, тем оно более окатанно, т.е. очевидным является способ транспортировки материала при формировании структуры. Более крупное и тяжелое зерно склонно переноситься с помощью речного (водного) или ледового разноса, постепенно округляясь, в отличие от более тонкозернистого материала, имеющего преимущественно эоловый характер распространения в данных условиях [Astakhov et al.,

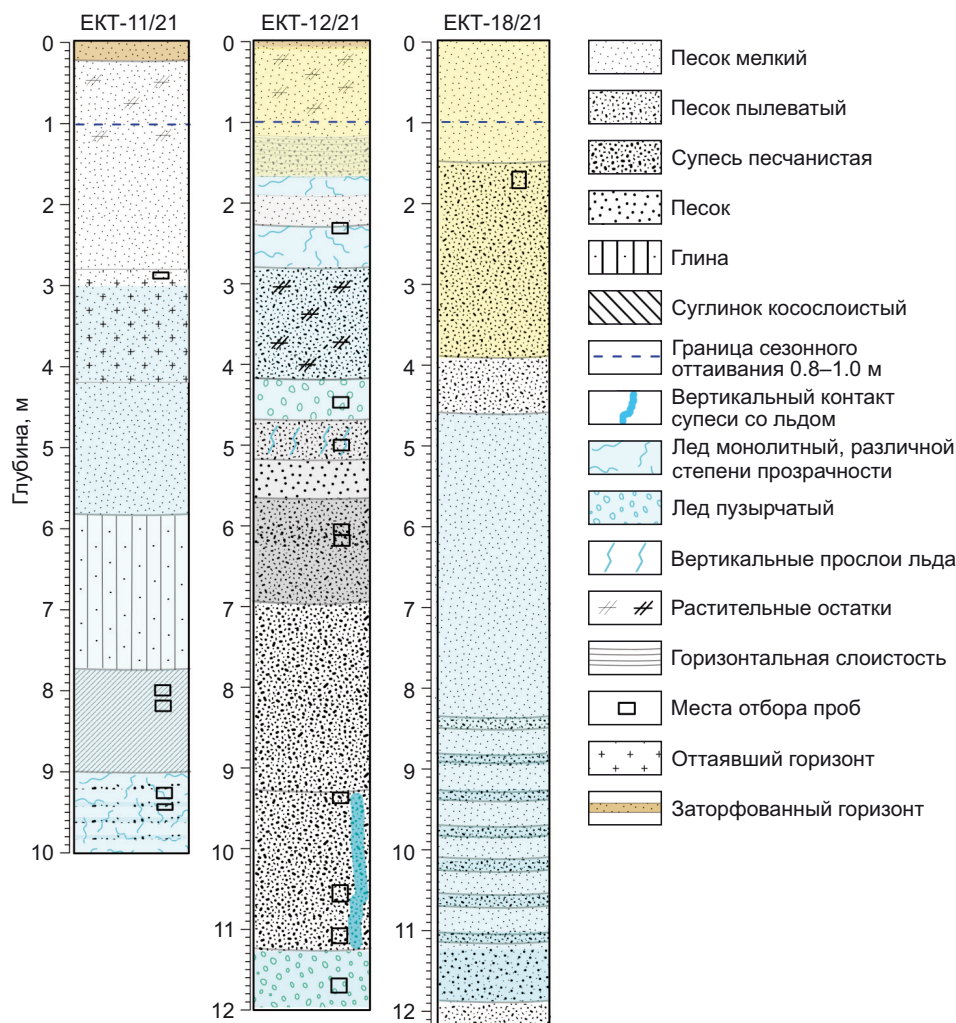


Рис. 2. Литологический состав ледогрунта и текстуры льда в буграх пучения [GOST..., 2020]. Голубым цветом выделены интервалы с содержанием льдистой части более 50 %, желтым – обозначены интервалы с преобладающей грунтовой частью.

Fig. 2. Lithological composition of ice-soil and ice texture in the ice mounds [GOST..., 2020]. Blue color indicates intervals of ice content higher than 50 %; yellow color indicates intervals of predominantly soil-ground content.

2022]. Таким образом, вероятнее всего, нижняя часть разреза накопила тонкозернистый пылеватый и пелитовый материал, переносимый в основном с ветром и атмосферными осадками. Верхняя часть, наоборот, формировалась посредством водного стока и ледового разноса, о чем может свидетельствовать повышенное содержание фракций, относимых к песку. Условную границу между верхней и нижней частью разреза можно провести по интервалу 4.2–4.7 м, представленному пузырьчатым льдом [Vologina et al., 2005].

Материал в скважине ЕКТ-11/21, при сравнении с материалом скважины ЕКТ 12/21, имеет относительно большую степень окатанности крупнозернистого материала, что говорит о динамике водного стока, однако тенденция к радикальному снижению степени окатанности средне- и тонкозернистой части осадка сохраняется (рис. 2).

Следует отметить, что пелитовая часть в разрезе скважин по данным микроскопии представлена преимущественно зернистой фракцией, весьма обедненной глинистыми минералами. То есть под микроскопом глин, которые образуются и вызревают на водосборной площади (пониженных зонах рельефа) при относительно теплых температурах, а потом поступают в водоемы стока, в исследуемом материале в существенных объемах не обнаружено. Таким образом, можно предположить, что условий для потеплений и переотложения материала осадков при формировании и за время существования бугров пучения практически не существовало.

3.2. Изотопный состав атмосферных осадков в районе исследования

Для оценки влияния атмосферных осадков в процессах формирования подземных и поверхностных вод, участвовавших в образовании льда бугров пучения, были проанализированы данные по стабильным изотопам кислорода и водорода современных осадков в районе исследования. На рис. 3 – график соотношений среднемесячных изотопных значений δD и $\delta^{18}O$ в осадках по данным Глобальной сети изотопов в осадках (GNIP) МАГАТЭ [IAEA..., 2022]. Для сравнения использованы среднемесячные значения изотопного состава осадков ближайшего г. Салехарда (58 точек), который расположен в 210 км к юго-западу от объектов исследования, и с. Амдерма (74 точки), расположенного в 355 км к северо-западу на берегу Карского моря. Для г. Салехарда имеются среднемесячные значения за 1996–2000 гг., для с. Амдермы – за 1980–1990 гг. Средневзвешенный изотопный состав $\delta^{18}O$ и δD летних осадков имеет значения -11.43 и -92.37 ‰ соответственно. Изотопные данные приведены в Прил. 1, табл. 1.1. Состав зимних осадков $\delta^{18}O$ и δD равен -22.47 и -163.91 ‰. В течение года среднемесячные значения изотопного состава варьируются в широких пределах. В летние месяцы по $\delta^{18}O$ значения изменяются от -7.6 до -14.1 ‰ и по δD – от -65.9 до -110.3 , в зимние месяцы по $\delta^{18}O$ – от -14.2 до -30.2 и по δD – от -113.7 до -236.8 ‰. Коэффициенты наклона линий регрессии на рис. 3 несколько ниже 8 и характерны для областей с низкой температурой конденсации.

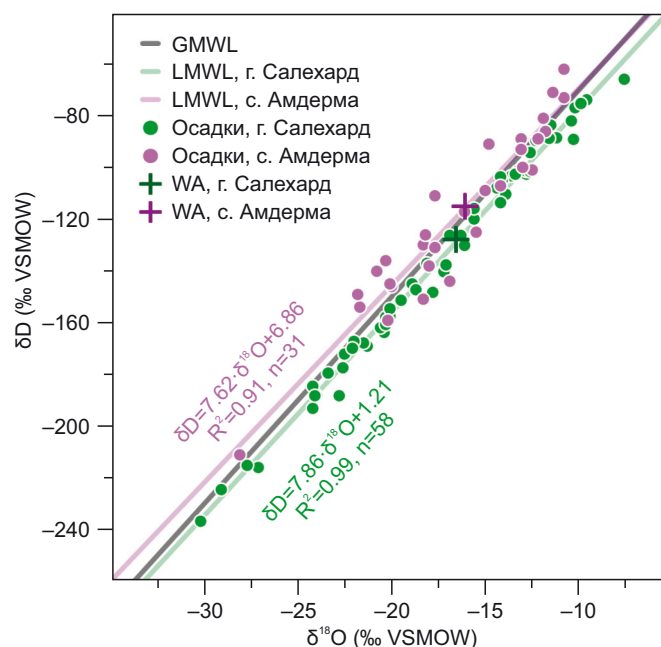


Рис. 3. Соотношения среднемесячных изотопных значений δD и $\delta^{18}O$ в осадках Амдермы и Салехарда (метеостанция Лабытнанги) на основе данных GNIP [IAEA..., 2022]. GMWL – глобальная линия метеорных вод, LMWL – локальная линия метеорных вод, WA – среднегодовое (средневзвешенное) значение.

Fig. 3. Ratios of monthly average isotopic values δD and $\delta^{18}O$ in precipitation of Amderma and Salekhard (Labytynangi weather station) based on data of GNIP [IAEA..., 2022]. GMWL – global meteoric water line, LMWL – local meteoric water line, WA – weighted (average) annual.

3.3. Изотопный состав расплавов льда

В Прил. 1, табл. 1.2, представлены измеренные изотопные данные. Все опробованные интервалы глубин расположены глубже нижней границы сезонно-талого слоя. По всем расплавам льда диапазон значений составляет по $\delta^{18}\text{O}$ от -13.8 до -19.37 , по δD от -106.31 до -151.05 , d-excess – от 2.49 до 11.99 ‰.

Диапазоны изотопных значений расплавов льда, отобранных из скважин ЕКТ 11/21 и ЕКТ-12/21, для которых имеются наиболее полные данные, значительно различаются (рис. 4). По скв. ЕКТ-11/21 изотопные значения изменяются по $\delta^{18}\text{O}$ от -13.8 до -16.16 , по δD от -106.31 до -121.01 , d-excess – от 3.97 до 8.28 ‰. Как видно в табл. 2, с увеличением глубины значения δ в целом становятся тяжелее, а d-excess уменьшается. Уравнение регрессии имеет вид $\delta\text{D}=6.45\cdot\delta^{18}\text{O}-17.2$. Угловой коэффициент линии регрессии 6.45 отличается от коэффициента, характерного для глобальной линии осадков (GMWL), и совпадает с предсказанным моделью повторного замерзания в системе вода – лед с участием процесса изотопного фракционирования Релея [Gat, 1996; Jouzel, Souchez, 1982; Lehmann, Siegenthaler, 1991; Souchez, Jouzel, 1984; Souchez, Groote, 1985]. Точки интервала $2.8-2.9$ м в уравнение не включены по причине их значительного выпадения из ряда и смещения в сторону локальной линии метеорных вод (для г. Салехарда). В разрезе от 2.8 до 4.2 м во время бурения был вскрыт интервал грунта в оттаявшем состоянии,

он представлял собой водонасыщенный песок, из которого проба воды выделялась путем отстаивания.

В расплавах льда скв. ЕКТ-12/21 изотопные значения составляют по $\delta^{18}\text{O}$ от -17.05 до -19.73 , по δD – от -125.74 до -151.05 , d-excess от 2.49 до 11.99 ‰. По мере увеличения глубины значения δ в пробах скважины становятся меньше. Уравнения регрессии $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ для разных интервалов глубины скважины несколько различаются. В нижней части на глубине $6-12$ м уравнение имеет вид $\delta\text{D}=7.4\cdot\delta^{18}\text{O}-4.9$, $R^2=99$, $n=14$ (исключая интервал глубины $10.52-11.20$ м). Затем на глубине $4.4-5.1$ м $\delta\text{D}=7.05\cdot\delta^{18}\text{O}-9.14$, $R^2=48$, $n=10$. В верхней части скважины на глубине $2.20-2.37$ м $\delta\text{D}=4.2\cdot\delta^{18}\text{O}-53.8$, $R^2=89$, $n=5$. По скв. ЕКТ-18/21 изотопные значения расплавов льда лежат на глобальной линии осадков и составляют по $\delta^{18}\text{O}$ от -17.01 до -17.22 , по δD от -124.85 до -126.49 , d-excess от 10.83 до 11.36 ‰. $\delta\text{D}=5.6\cdot\delta^{18}\text{O}-30.2$, $R^2=99$, $n=5$.

Наклоны линии регрессии 7.05 и 7.40 близки к таковым для атмосферных осадков района исследования. Наклоны линии регрессии 4.2 и 5.6 более характерны для снежных покровов и показывают изменение изотопных концентраций в процессах метаморфизации снега после выпадения [Hashimoto et al., 2002]. Предполагается, что во влажном снежном покрове при 0°C рост и таяние снежинок происходят одновременно [Raymond, Tusima, 1979]. Во время таяния снега изотопное фракционирование игнорируют из-за

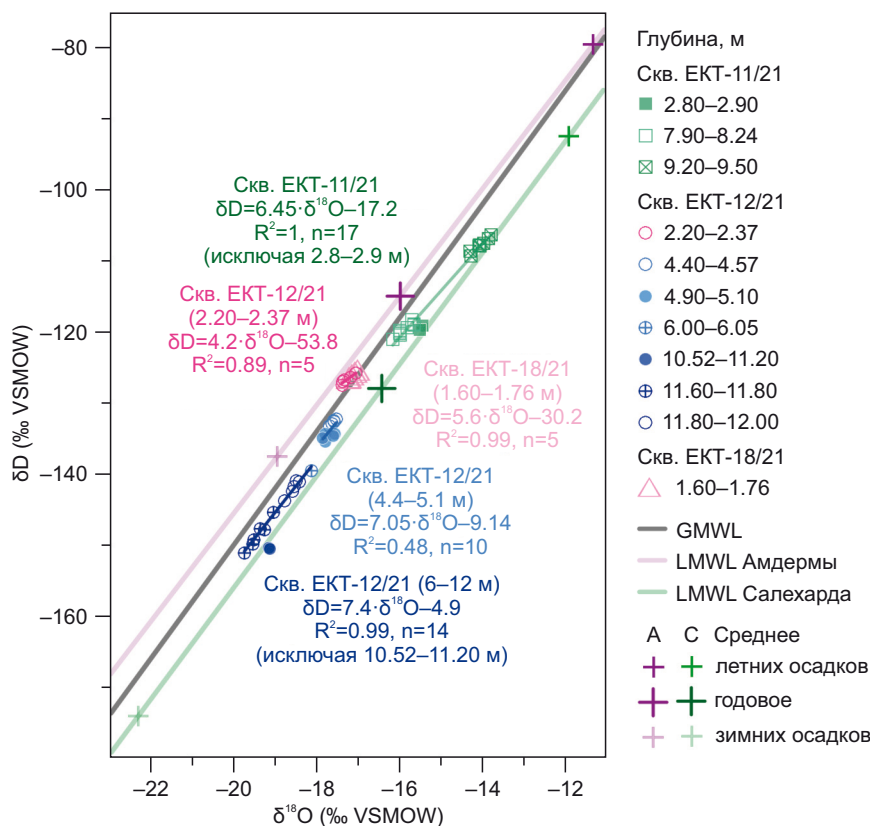


Рис. 4. Соотношения δD и $\delta^{18}\text{O}$ в расплавах льдов, слагающих бугры пучения.

Fig. 4. δD and $\delta^{18}\text{O}$ ratios in melted ice composing the ice mounds.

затрудненных процессов диффузии в ледяной матрице [Jouzel, Souchez, 1982; Souchez, Groote, 1985].

Слабый коэффициент детерминации $R^2=48$ между δD и $\delta^{18}O$ на глубине 4.4–5.1 м, скорее всего, говорит о смешении воды из разных источников.

На рис. 4 точки интервала 10.52–11.20 м скв. ЕКТ-12/21 находятся ниже местной линии осадков (для г. Салехарда). На глубине от 9.3 до 11.3 м прослеживался вертикальный контакт супеси с чистым льдом без примесей, что может говорить о возможности инъекционных процессов формирования льда.

Изотопные значения расплавов льда в ядрах скважины ЕКТ-12/21 до глубины 4.57 м и в верхних горизонтах скважины ЕКТ-18/21 находятся в диапазоне $\delta^{18}O$ от -17 до -21 ‰, это соотносится с данными по

сингенетическим повторно-жильным льдам Ямала, отнесенным к MIS-1 [Streletskaia et al., 2013, 2021]. Изотопные данные свидетельствуют о подобных условиях формирования льда и согласуются с положением бугров пучения ЕКТ-12/21 и ЕКТ-18/21 в аллювиальных отложениях голоцена.

3.4. Источники воды, формирующей лед в буграх пучения

Для определения источника льда в буграх пучения используется значение избытка дейтерия d-excess и дополнительный параметр – угловой коэффициент линии регрессии между d-excess и δD (S_{d-D}).

На рис. 5, а, б, приведено соотношение d-excess и $\delta^{18}O$ / δD . Для атмосферных осадков района исследования

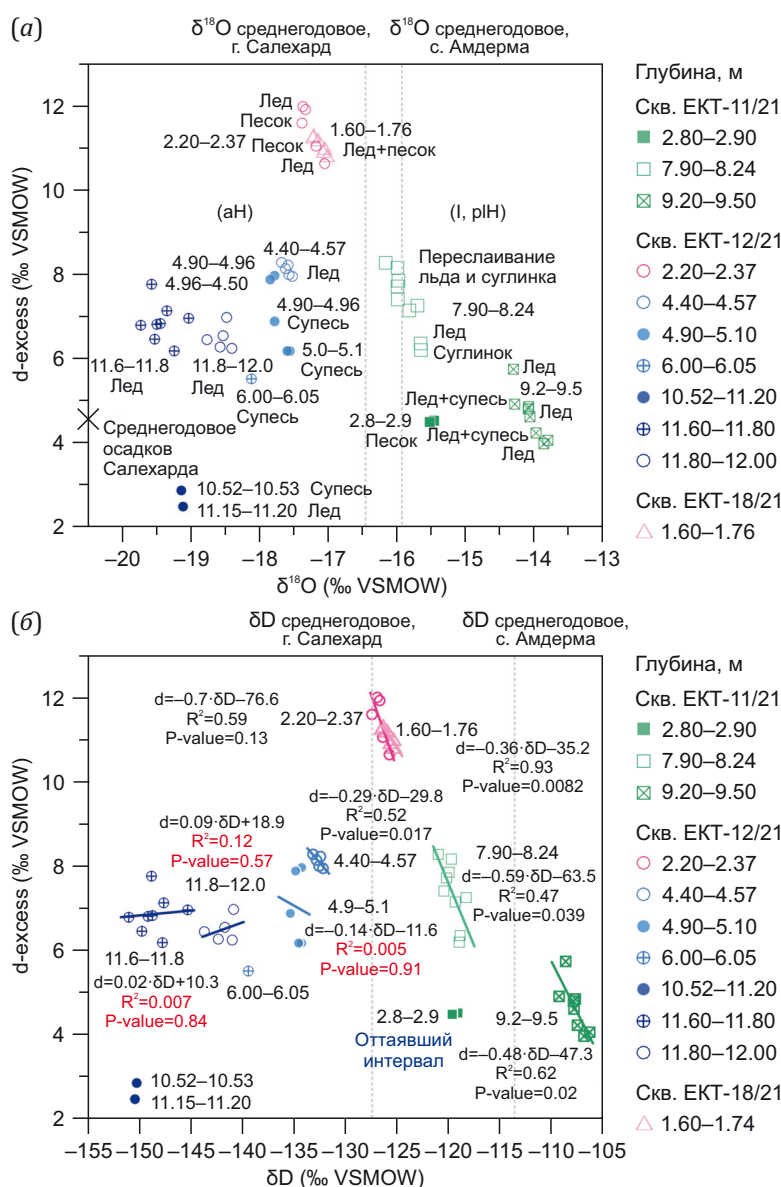


Рис. 5. Соотношение d-excess и $\delta^{18}O$ (а) и соотношение d-excess и δD (б) в расплавах льда из бугров пучения. Линии регрессии соответствуют интервалам глубин.

Fig. 5. Ratios of d-excess and $\delta^{18}O$ (a) and ratios of d-excess and δD (б) in melted ice from the ice mounds. The regression lines correspond to depth intervals.

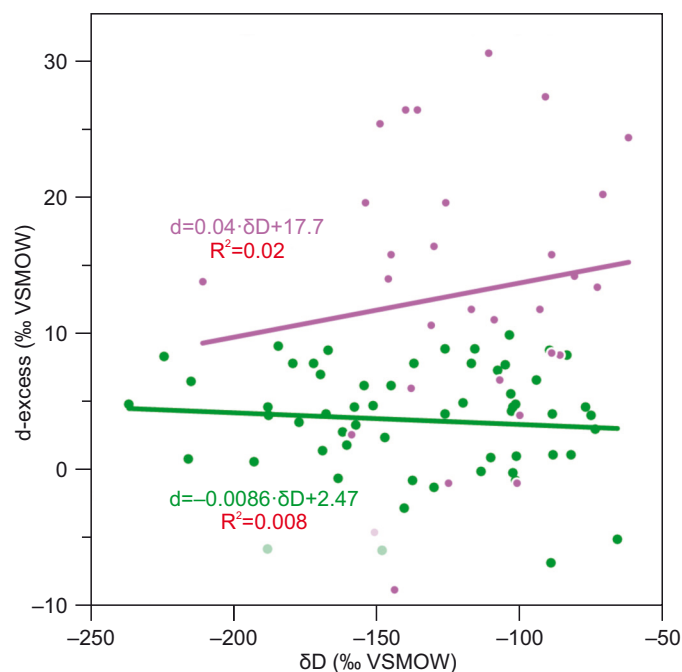


Рис. 6. Соотношения d-excess и δD в осадках г. Салехарда (зеленые точки) и с. Амдермы (фиолетовые точки). График построен по среднемесячным значениям изотопных данных GNIP [IAEA..., 2022].

Fig. 6. Ratios d-excess and δD in precipitation from Salekhard (green dots) and from Amderma (purple dots). The graph is plotted based on monthly average isotope data of GNIP [IAEA..., 2022].

уравнение регрессии d-excess- δD имеет положительный или близкий к нулю угловой коэффициент S_{d-D} и характеризуется отсутствием корреляции (рис. 6). Такие же параметры уравнения характерны для теоретических параметров льда, имеющего происхождение из фирнизированного снега [Lacelle, 2011]. Положительный наклон S_{d-D} 0.02 и 0.09 и отсутствие корреляции наблюдаются в уравнениях для интервалов глубин от 4.9 до 12 м в скв. ЕКТ-12/21 (см. рис. 4). Это сравнение говорит о том, что источником воды для формирования льдов служили разновременные атмосферные осадки в виде снега.

Дейтериевый эксцесс 2.49–2.87 ‰, полученный для двух проб интервала 10.52–11.20 м ЕКТ12/21, в совокупности с формой залегания ледяного шира может свидетельствовать о его инъекционной природе. В арктических районах Якутии значения d-excess ниже 3.5 ‰ наблюдались в поверхностных водотоках, озерных водах, водах межмерзлотных источников и наледях [Galanin et al., 2019].

Точки скв. ЕКТ-11/21, ЕКТ-18/21 и интервалов скв. ЕКТ-12/21 до глубины 4.57 м выстраиваются в наклонные линии с отрицательным соотношением S_{d-D} (см. рис. 5, 6). Полученные значения углового коэффициента между d-excess и δD от -0.14 до -0.70 близки к теоретическим значениям для льда, сформировавшегося в условиях равновесного замерзания воды, когда скорость замерзания меньше, чем коэффициент диффузии молекул воды [Lacelle, 2011]. При этом формируется сегрегационный или инъекционно-сегрегационный пластовый лед [Vasil'chuk, 2012].

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения стабильных изотопов кислорода и водорода в расплавах льдов из скважин, пробуренных в буграх пучения, позволили выделить два основных типа льда (по источнику формирования). Первый – лед, образовавшийся в результате медленного замерзания объема воды в жидкой фазе с возможностью изотопного фракционирования, второй – из фирнизированного снега [Gat, 1996; Jouzel, Souchez, 1982; Lehmann, Siegenthaler, 1991; Souchez, Groote, 1985].

В пробах льда скв. ЕКТ-11/21 соотношение δD – $\delta^{18}O$ с наклоном 6.45 (см. рис. 4) показывает криогенное фракционирование с последовательным понижением значений δD и $\delta^{18}O$ в процессе замерзания водонасыщенных озерных отложений от первых порций льда к последующим с одновременным увеличением d-excess (см. рис. 5, 6), что свидетельствует о промерзании в закрытой системе в условиях изолированного талика [Vasil'chuk et al., 2016, 2019]. На это же указывают отрицательные коэффициенты наклона S_{d-D} -0.49 и -0.58 и значимая корреляция между d-excess и δD . При этом, как видно на рис. 5, 6, промерзание водонасыщенных отложений и образование льда происходили в направлении от нижних горизонтов к верхним, поскольку в распределении значений отмечается более тяжелый изотопный состав расплавов в нижней части разреза и его последовательное облегчение в вышележающих интервалах опробования. Подобный механизм льдообразования наблюдается при промерзании и дегградации подозерного талика, который сопровождается интенсивным льдообразованием в таликовой зоне и

выпучиванием вышележащих талых грунтов [Zhestkova, Shur, 1982].

Изучение степени окатанности минерального материала в пробах подтверждает озерно-аллювиальное происхождение минеральных частиц, переработанных водным стоком и осажженных в озерных условиях.

Для расплавов льдов нижних интервалов скв. ЕКТ-12/21 6–12 м (за исключением двух точек 10.52–11.20) характерно соотношение $\delta D - \delta^{18}O$ с наклоном, близким к 7, свойственное атмосферным осадкам территории исследования. Уравнения на рис. 5, 6, с положительными угловыми коэффициентами и отсутствием корреляции между $d\text{-excess}$ и δD также указывают на состав льда, близкий к атмосферным осадкам.

На глубине 4.57 м происходит смена источника льда, что подтверждается изотопными данными: коэффициенты регрессии $\delta D - \delta^{18}O$ существенно понижаются до 4.2 и 5.6, а наклон S_{d-D} до -0.29 и -0.7 со значимой корреляцией становится характерным для равновесного замерзания воды, сопровождающегося изотопным фракционированием. Также меняется и характер распределения минеральных частиц в пробах грунта – эоловый материал в нижней части разреза и частицы, переносимые водным стоком, – в верхней. Вероятно, формирование бугра пучения ЕКТ-12/21 происходило многостадийно. Одна из стадий связана с аккумуляцией фирнового снега, сопровождающейся накоплением эоловых отложений с последующей метаморфизацией снежно-фирновой толщи и смешением с талыми водами. Другая стадия – последующее перекрытие осадками, образованными водными потоками. Лдообразование при этом, возможно, происходило сингенетично с накоплением осадков.

На основании проведенных исследований удалось определить условия формирования льда бугров пучения, связанные с осадконакоплением озерно-аллювиальных и эоловых отложений террас и многоэтапным промерзанием грунтов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изотопные соотношения, рассчитанные для образцов льда из керна скважин, пробуренных в нижнем течении р. Ерката-Яха, помогли определить особенности формирования льда в многолетнемерзлых породах бугров пучения.

На основании полученных данных удалось выявить различные источники подземных и поверхностных вод, атмосферных осадков, участвующих в формировании льда бугров пучения, а также установить влияние других факторов (циклы промерзания и оттаивания, метаморфизации льда). По типу источника выделяются сингенетические, эпигенетические и инъекционные льды. Сингенетические льды образовались из атмосферных осадков в виде фирнизированного снега с прослоями эоловых отложений. Они претерпели изменение в ходе последующей метаморфизации осадков и перекристаллизации льда. Эпигенетические льды возникли при промерзании водонасыщенных

грунтов подозерного талика. Их формирование сопровождалось фракционированием изотопов в ходе образования льда в закрытых условиях. Инъекционные льды отмечаются в интервалах с вертикальными трещинами, расплавы льдов при этом имеют пониженное смещение по дейтерию относительно других типов расплавов льда.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

В работе задействовано оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН.

The work was conducted using equipment and infrastructure of the Centre for Geodynamics and Geochronology at the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Astakhov V., 2004. Middle Pleistocene Glaciations of the Russian North. *Quaternary Science Reviews* 23 (11–13), 1285–1311. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.12.011>.
- Astakhov V., Pestova L., Shkatova V., 2022. Loessoids of Russia: Varieties and Distribution. *Quaternary International* 620, 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.01.005>.
- Badu Yu.B., Nikitin K.A., 2020. Frost Mounds Within the Gas-Bearing Structures Areas, Northern Part of West Siberia. *Earth Cryosphere XXIV* (6), 21–32 (in Russian) [Баду Ю.Б., Никитин К.А. Бугры пучения на площади газоносных структур севера Западной Сибири // Криосфера Земли. 2020. Т. XXIV. № 6. С. 21–32]. DOI:10.21782/KZ1560-7496-2020-6(21-32).
- Beck H.E., Zimmermann N.E., McVicar T.R., Vergopolan N., Berg A., Wood E.F., 2018. Present and Future Köppen-Geiger Climate Classification Maps at 1-km Resolution. *Science Data* 5, 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>.
- Bogoyavlensky V.I., Sizov O.S., Nikonov R.A., Bogoyavlensky I.V., Kargina T.N., 2020. Earth Degassing in the Arctic: The Genesis of Natural and Anthropogenic Methane Emissions. *Arctic Ecology and Economy* 3 (39), 6–22 (in Russian) [Богоявленский В.И., Сизов О.С., Никонов Р.А., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н. Дегазация Земли в Арктике:

генезис природной и антропогенной эмиссии метана // Арктика: экология и экономика. 2020. № 3 (39). С. 6–22]. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-3-6-22>.

Buddo I., Misyurkeeva N., Shelokhov I., Shein A., Sankov V., Rybchenko A., Dobrynina A., Nezhdanov A. et al., 2024. Modeling of Explosive Pingo-Like Structures and Fluid-Dynamic Processes in the Arctic Permafrost: Workflow Based on Integrated Geophysical, Geocryological, and Analytical Data. *Remote Sensing* 16 (16), 2948. <https://doi.org/10.3390/rs16162948>.

Buddo I.V., Misyurkeeva N.V., Shelokhov I.A., Shein A.N., Gutareva O.S., Smirnov A.S., Chernykh A.A., 2023. Prerequisites and Experience of the Study of Ice Mounds in the Arctic Region. In: Saint-Petersburg 2023. Geosciences: A Time of Change, a Time of Prospects. Collected Proceedings of the 10th Anniversary Scientific-Practical Conference (April 17–20, 2023). EAGE Geomodel, Moscow, p. 201–204 (in Russian) [Буддо И.В., Мисюркеева Н.В., Шелохов И.А., Шеин А.Н., Гутарева О.С., Смирнов А.С., Черных А.А. Предпосылки и опыт комплексного изучения бугров пучения в регионе Арктики // Санкт-Петербург 2023. Геонауки: время перемен, время перспектив: Сборник материалов 10-й юбилейной научно-практической конференции (17–20 апреля 2023 г.). М.: ЕАГЕ Геомодель. С. 201–204].

Chuvilin E., Ekimova V., Davletshina D., Sokolova N., Bukhanov B., 2020. Evidence of Gas Emissions from Permafrost in the Russian Arctic. *Geosciences* 10 (10), 383. <https://doi.org/10.3390/geosciences10100383>.

Circumpolar Active Layer Monitoring Network (CALM). R58 Yerkuta. 2021. Available from: <https://www2.gwu.edu/~calm/> (Last Accessed September 15, 2024).

Craig H., 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science* 133 (3465), 1702–1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>.

Dansgaard W., 1964. Stable Isotopes in Precipitation. *Tellus* 16 (4), 436–468. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i4.8993>.

Ekaikin A.A., 2016. Stable Water Isotopes in Glaciology and Paleogeography. Methodological Manual. Saint-Petersburg, 38 p. (in Russian) [Екайкин А.А. Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии: Методическое пособие. СПб., 2016. 38 с.].

Galanin A.A., Pavlova M.R., Papina T.S., Eyrikh A.N., Pavlova N.A., 2019. Stable Isotopes of ^{18}O and D in Key Components of Water Flows and the Permafrost Zone of Central Yakutia (Eastern Siberia). *Ice and Snow* 59 (3), 333–354 (in Russian) [Галанин А.А., Павлова М.Р., Папина Т.С., Эйрих А.Н., Павлова Н.А. Стабильные изотопы ^{18}O и D в ключевых компонентах водного стока и криолитозоны Центральной Якутии (Восточная Сибирь) // Лёд и снег. 2019. Т. 59. № 3. С. 333–354]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-414>.

Gat J.R., 1996. Oxygen and Hydrogen Isotopes in the Hydrologic Cycle. *Annual Reviews in Earth Planetary Science* 24, 225–262. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.24.1.225>.

GOST 25100-2020, 2020. Grounds. Classification. Standardinform, Moscow, 38 p. (in Russian) [ГОСТ 25100-2020.

Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020. 38 с.].

Hashimoto S., Shiqiao Z., Nakawo M., Sakai A., Ageta Y., Ishikawa N., Narita H., 2002. Isotope Studies of Inner Snowlayers in a Temperate Region. *Hydrological Process* 16 (11), 2209–2220. <https://doi.org/10.1002/hyp.1151>.

IAEA Global Network of Isotopes in Precipitation, 2022. Database. Available from: <https://www.iaea.org/services/networks/gnip> (Last Accessed November 28, 2024).

Jouzel J., Souchez R.A., 1982. Melting and Refreezing at the Glacier Sole and the Isotopic Composition of the Ice. *Journal of Glaciology* 28 (98), 35–42. <https://doi.org/10.3189/s0022143000011771>.

Khimenkov A., Stanilovskaya J., 2022. Explosive Processes in Permafrost as a Result of the Development of Local Gas-Saturated Fluid-Dynamic Geosystems. *Gases* 2 (4), 146–165. <https://doi.org/10.3390/gases2040009>.

Kraev G., Belonosov A., Veremeeva A., Grabovskii V., Sheshukov S., Shelokhov I., Smirnov A., 2022. Fluid Migration Through Permafrost and the Pool of Greenhouse Gases in Frozen Soils of an Oil and Gas Field. *Remote Sensing* 14 (15), 3662. <https://doi.org/10.3390/rs14153662>.

Kraev G., Rivkina E., Vishnivetskaya T., Belonosov A., van Huissteden J., Kholodov A., Smirnov A., Kudryavtsev A., Teshbaeva K., Zamolodchikov D., 2019. Methane in Gas Shows from Boreholes in Epigenetic Permafrost of Siberian Arctic. *Geosciences* 9 (2), 67. <https://doi.org/10.3390/geosciences9020067>.

Lacelle D., 2011. On the $\delta^{18}\text{O}$, δD and D-Excess Relations in Meteoric Precipitation and During Equilibrium Freezing: Theoretical Approach and Field Examples. *Permafrost and Periglacial Processes* 22 (1), 13–25. <https://doi.org/10.1002/ppp.712>.

Lehmann M., Siegenthaler U., 1991. Equilibrium Oxygen- and Hydrogen-Isotope Fractionation Between Ice and Water. *Journal of Glaciology* 37 (125), 23–26. <https://doi.org/10.3189/S0022143000042751>.

Leibman M.O., Dvornikov Yu.A., Streletskaya I.D., Khomutov A.V., Kizyakov A.I., Vanshtein B.G., Semyonov P.B., 2018. Connection Between the Gas Emission Craters Formation and Methane Emission in the North of Western Siberia. *Actual Problems of Oil and Gas* 4 (23), 60 (in Russian) [Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Стрелецкая И.Д., Хомутов А.В., Кизяков А.И., Ванштейн Б.Г., Семенов П.Б. Связь формирования воронок газового выброса с эмиссией метана на севере Западной Сибири // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Т. 4 (23). С. 60]. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art60>.

Mahaney W.C., 2002. Atlas of Sand Grain Surface Textures and Applications. Oxford University Press, New York, 237 p.

Misyurkeeva N., Buddo I., Kraev G., Smirnov A., Nezhdanov A., Shelokhov I., Kurchatova A., Belonosov A., 2022. Periglacial Landforms and Fluid Dynamics in the Permafrost Domain: A Case from the Taz Peninsula, West Siberia. *Energies* 15 (8), 2794. <https://doi.org/10.3390/en15082794>.

Olenchenko V.V., Sinitsky A.I., Antonov E.Y., Yeltsov I.N., Kushnarenko O.N., Plotnikov A.E., Potapov V.V., Epov M.I.,

2015. Results of Geophysical Surveys of the Area of "Yamal Crater", the New Geological Structure. *Earth Cryosphere* XIX (4), 84–95.

Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.J., Bates B., Peterman K., Keeseey S., Schlenk M. et al., 2018. ArcticDEM. Version 1. Available from: <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH> (Last Accessed September 15, 2024).

Raymond C.F., Tusima K., 1979. Grain Coarsening of Water-Saturated Snow. *Journal of Glaciology* 22 (86), 83–105. <https://doi.org/10.1017/S0022143000014076>.

Schurmeier L., Brouwer G., Fagents S., 2023. Formation of the Siberian Yamal Gas Emission Crater via Accumulation and Explosive Release of Gas Within Permafrost. *Permafrost and Periglacial Processes* 35 (1), 33–45. <https://doi.org/10.1002/ppp.2211>.

Shvanov V.N., 1987. Petrography of Sandstones (Component Composition, Systematics, and Mineral Descriptions). Nedra, Leningrad, 269 p. (in Russian) [Шванов В.Н. Петрография песчаных пород (компонентный состав, систематика и описание минеральных видов). Л.: Недра, 1987. 269 с.].

Souchez R.A., Groote J.M., 1985. δD – $\delta^{18}O$ Relationships in Ice Formed by Subglacial Freezing: Paleoclimatic Implications. *Journal of Glaciology* 31 (109), 229–232. <https://doi.org/10.3189/S0022143000006547>.

Souchez R.A., Jouzel J., 1984. On the Isotopic Composition in δD and $\delta^{18}O$ of Water and Ice During Freezing. *Journal of Glaciology* 30 (106), 369–372. <https://doi.org/10.3189/S0022143000006249>.

State Geological Map of the Russian Federation, 2015. West Siberian Series. Scale of 1:1000000. Sheet R-42 (Yamal Peninsula). Explanatory Note. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 366 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Западно-Сибирская серия. Масштаб 1:1000000. Лист R-42 (п-ов Ямал): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2015. 366 с.].

Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (Eds), 2013. *Climate Change 2013. The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, 1535 p.

Streletskaia I.D., Pismeniuk A.A., Vasiliev A.A., Gusev E.A., Oblogov G.E., Zadorozhnaya N.A., 2021. The Ice-Rich Permafrost Sequences as a Paleoenvironmental Archive for the Kara Sea Region (Western Arctic). *Frontiers in Earth Science* 9, 723382. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.723382>.

Streletskaia I.D., Vasiliev A.A., Oblogov G.E., Matyukhin A.G., 2013. Isotopic Composition on Ground Ice in Western Yamal (Marre-Sale). *Ice and Snow* 53 (2), 83–92 (in Russian) [Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Облогов Г.Е., Матюхин А.Г. Изотопный состав подземных льдов Западного Ямала (Марре-Сале) // Лёд и снег. 2013. Т. 53. № 2. С. 83–92]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-2-83-92>.

Trofimov V.T., Badu Yu.B., Vasilchuk Yu.K., Kashperuk P.I., Kudryashov V.G., Firsov N.G., 1987. *Geocryological Zoning of the West Siberian Plate*. Nauka, Moscow, 210 p. (in Russian) [Трофимов В.Т., Бадю Ю.Б., Васильчук Ю.К., Кашперук П.И., Кудряшов В.Г., Фирсов Н.Г. Геокриологическое районирование Западно-Сибирской плиты. М.: Наука, 1987. 219 с.].

Vasil'chuk Yu.K., 2012. *Stable Isotope Geochemistry of Massive Ice*. Vol. I. Part 2. MSU Publishing House, Moscow, 472 p. (in Russian) [Васильчук Ю.К. Геохимия стабильных изотопов пластовых льдов. М.: Изд-во МГУ, 2012. Т. I. Ч. 2. 472 с.].

Vasil'chuk Yu.K., Kurchatova A.N., Budantseva N.A., Rogov V.V., Chizhova J.N., 2019. Variations of Stable Oxygen and Hydrogen Isotopes in the Ice Core of the Pingo (Southern Part of Gydan Peninsula). *Doklady Earth Sciences* 488, 1137–1141. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19090319>.

Vasil'chuk Yu.K., Lawson D.E., Yoshikawa K., Budantseva N.A., Chizhova J.N., Podborny Y.Y., Vasil'chuk A.C., 2016. Stable Isotopes in the Closed-System Weather Pingo, Alaska and Pestsovoe Pingo, North-Western Siberia. *Cold Regions Science and Technology* 128, 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.05.001>.

Vologina E.G., Granin N.G., Vorob'eva S.S., Francus P., Lomonosova T.K., Kalashnikova I.A., Granina L.Z., 2005. Ice Transportation of Sand-Silty Material in South Baikal. *Russian Geology and Geophysics* 46 (4), 424–430 (in Russian) [Вологина Е.Г., Гранин Н.Г., Воробьева С.С., Франкус П., Ломоносова Т.К., Калашникова И.А., Гранина Л.З. Ледовый разнос песчано-алевритового материала в Южном Байкале // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 4. С. 424–430].

Vorobyev S.A., Bychkov A.Y., Khilimonyuk V.Z., Buldovitz S.N., Ospennikov E.N., Chuvilin E.M., 2019. Formation of the Yamal Crater in Northern West Siberia: Evidence from Geochemistry. *Geosciences* 9 (12), 515. <https://doi.org/10.3390/geosciences9120515>.

Yapaskurt O.V., 2008. *Lithology*. Akademiya, Moscow, 336 p. (in Russian) [Япаскерт О.В. Литология. М.: Академия, 2008. 336 с.].

Zhestkova T.N., Shur Yu.L., 1982. On the Mechanism of Infiltration and Segregation for the Formation of Ice Laminæ. In: A.I. Popov (Ed.). *Ice Laminæ in the Cryolite Zone*. Permafrost Institute, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, Yakutsk, p. 105–115 (in Russian) [Жесткова Т.Н., Шур Ю.Л. Об инфильтрационно-сегрегационном механизме образования пластовых льдов // Пластовые льды криолитозоны / Ред. А.И. Попов. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1982. С. 105–115].

Zolkos S., Fiske G., Windholz T., Duran G., Yang Z., Olenchenko V.V., Faguet A., Natali S.M., 2021. Detecting and Mapping Gas Emission Craters on the Yamal and Gydan Peninsulas, Western Siberia. *Geosciences* 11 (1), 21. <https://doi.org/10.3390/geosciences11010021>.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

Таблица 1.1. Средневзвешенные изотопные значения атмосферных осадков (по данным МАГАТЭ [IAEA..., 2022])**Table 1.1.** Weighted averages isotopic values of atmospheric precipitation (from the IAEA data [IAEA..., 2022])

	с. Амдерма	г. Салехард
Уравнение осадков	$\delta D = 7.62 \cdot \delta^{18}O + 6.86$	$\delta D = 7.86 \cdot \delta^{18}O + 1.21$
Т среднегодовая, °C	-6.2	-6.1
Т среднезимняя, °C (с мая по октябрь)	-14.5	-16
Т среднелетняя, °C	5.2	8.6
Среднегодовые		
$\delta^{18}O$	-16.08	-16.55
δD	-114.9	-127.9
d-excess	13.7	4.52
Зима		
$\delta^{18}O$	-18.98	-22.2
δD	-137.49	-173.96
d-excess	14.3	3.6
Лето		
$\delta^{18}O$	-11.79	-12.02
δD	-79.58	-92.49
d-excess	14.8	3.7

Таблица 1.2. Значения δ в пробах скважин ЕКТ-11/21, ЕКТ-12/21 и ЕКТ-18/21**Table 1.2.** δ values in ЕКТ-11/21, ЕКТ-12/21 and ЕКТ-18/21 borehole samples

№	Интервал глубины	Описание	$\delta^{18}O$	δD	d-excess
ЕКТ 11/21					
1	2.80–2.85	Песок мелкий	-15.45	-119.1	4.5
2	2.88–2.9		-15.52	-119.6	4.5
3	7.90–7.94	Лед с тонкими шлирами серого суглинка, косослоистая криотекстура	-15.81	-119.7	7.1
4	7.94–7.98		-15.99	-119.7	8.2
5	7.99–8.02		-15.69	-118.3	7.3
6	8.02–8.05		-15.65	-118.9	6.4
7	8.10–8.13	Суглинок, косослоистая криотекстура	-15.97	-119.9	7.9
8	8.13–8.15		-16.16	-121.0	8.3
9	8.15–8.20	Шлир льда	-15.98	-120.4	7.4
10	8.20–8.22	Суглинок серый косослоистый	-15.65	-119.0	6.2
11	8.22–8.24	Суглинок серый косослоистый	-15.99	-120.2	7.7
12	9.20–9.25–1	Лед прозрачный с прослоями супеси песчанистой	-14.07	-107.7	4.9
13	9.20–9.25–2	Слоистый лед	-14.08	-107.9	4.8
14	9.25–9.27	Слоистый лед	-14.30	-108.6	5.7
15	9.32–9.34	Супесь песчанистая	-14.28	-109.3	4.9
16	9.39–9.40	Лед	-14.06	-107.9	4.6
17	9.40–9.42	Лед с тонкими прослоями минеральных частиц, с пузырьками газов до 1.5 мм	-13.85	-106.8	4.0
18	9.43–9.45		-13.80	-106.3	4.1
19	9.45–9.50		-13.97	-107.5	4.2

Таблица 1.2 (продолжение)

Table 1.2 (continued)

№	Интервал глубины	Описание	$\delta^{18}\text{O}$	δD	d-excess
ЕКТ 12/21					
20	2.20–2.24	Шлиры льда в супеси	–17.33	–126.7	11.9
21	2.24–2.28	Шлиры льда в супеси	–17.37	–126.9	12.0
22	2.28–2.32	Песок мелкий серый	–17.38	–127.5	11.6
23	2.32–2.37–1	Шлиры льда молочно-белого в супеси	–17.05	–125.7	10.6
24	2.32–2.37–2	Супесь песчанистая с ледяными шлирами, размером до 1 см	–17.18	–126.4	11.1
25	4.40–4.44–1	Лед молочно-белый непрозрачный	–17.58	–132.4	8.2
26	4.40–4.44–2	Темный лед с включениями минеральных частиц	–17.52	–132.2	8.0
27	4.44–4.49	Лед с пузырьками газа с включениями минеральных частиц	–17.62	–132.8	8.1
28	4.49–4.53	Лед прозрачный	–17.57	–132.6	8.0
29	4.53–4.57	Лед прозрачный с пузырьками газа с включениями минеральных частиц	–17.68	–133.1	8.3
30	4.90–4.96–1	Супесь песчанистая серая с вертикальными шлирами льда	–17.78	–135.4	6.9
31	4.90–4.96–2	Шлир льда в супеси	–17.78	–134.3	8.0
32	4.96–5.00	Супесь песчанистая серая с вертикальными шлирами льда	–17.84	–134.9	7.9
33	5.00–5.05		–17.56	–134.3	6.2
34	5.05–5.10		–17.59	–134.6	6.2
35	6.00–6.05	Прослой песка среднезернистого в супеси	–18.12	–139.4	5.5
36	10.52–10.53	Супесь песчанистая серая, вертикальный контакт со льдом	–19.14	–150.3	2.9
37	11.15–11.20	Лед прозрачный с пузырьками газа на контакте с супесью	–19.12	–150.4	2.5
38	11.60–11.62	Лед прозрачный с пузырьками газа	–19.45	–148.7	6.8
39	11.64–11.62		–19.58	–148.8	7.8
40	11.62–11.64		–19.24	–147.8	6.2
41	11.66–11.69		–19.35	–147.6	7.1
42	11.69–11.72		–19.03	–145.3	7.0
43	11.72–11.74		–19.50	–149.2	6.8
44	11.74–11.75		–19.53	–149.7	6.5
45	11.75–11.79		–19.73	–151.0	6.8
46	11.80–11.83		–18.48	–140.9	7.0
47	11.83–11.86		–18.41	–141.0	6.2
48	11.86–11.91		–18.53	–141.7	6.5
49	11.92–11.96		–18.77	–143.7	6.4
50	11.96–11.98		–18.58	–142.3	6.3
ЕКТ 18/21					
51	1.60–1.62	Лед с многочисленными пузырьками газа до 3 мм	–17.21	–126.3	11.3
52	1.62–1.64		–17.01	–125.3	10.8
53	1.64–1.66		–17.07	–125.6	10.9
54	1.66–1.69		–17.22	–126.5	11.3
55	1.69–1.72		–17.15	–126.0	11.2
56	1.72–1.76	Песок пылеватый	–17.05	–125.4	11.0