УДК 551.345:544.02

Вариации изотопов кислорода и водорода в современной пластовой ледяной залежи в устье р. Аккани, Восточная Чукотка

© 2018 г. Ю.К. Васильчук¹, Ю.Н. Чижова^{2*}, А.А. Маслаков¹, Н.А. Буданцева¹, А.К. Васильчук¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия *eacentr@yandex.ru

Oxygen and hydrogen isotope variations in a recently formed massive ice at the mouth of the Akkani River, Eastern Chukotka

Yu.K. Vasil'chuk¹, Ju.N., Chizhova^{2*}, A.A. Maslakov¹, N.A. Budantseva¹, A.C. Vasil'chuk¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

²Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia *eacentr@vandex.ru

Received August 16, 2017

Accepted November 22, 2017

Keywords: buried ice, Chulkheveem River, Eastern Chukotka, hydrogen isotopes, Lavrentiya settlement, massive ice, oxygen isotopes, permafrost, proluvium, sea coast.

Summary

The object of this study is a recently (or in the Holocene) formed thick (up 2.7 m in height) buried massive ice body, exposed in 2 km South-East from the mouth of the river Akkani in the North-East of Chukotka in the vicinity of the settlement Lavrentiya. The structural-textural characteristics of ice and enclosing deposits are considered. It is shown that the overlying layers of sediments are loams with a slab structure and vertical-layer medium and thin-chill cryogenic structure and ice sockets. The ice of the body is very pure and transparent, visible to a depth of 0.5 m. There are some inclusions found in massive ice: sand and loams presented in forms of thin interlayers of particles or granules. The ice is full of bubbles. The main method of the research was the analysis of isotopes of oxygen and hydrogen within the stratified ice body, and also relationships between them as well as ratios between the deuterium excess and δ^2 H. The thick and relatively contemporary massive ice layer buried under a layer of proluvial sediments had been found for the first time, and together with this, the isotope variations of the buried ice (δ^2 H and δ^{18} O) were determined. The mean values of δ^{18} O and δ^2 H in the ice are rather stable and equal to -17.1 and -128.3%, respectively. These isotope characteristics may be used for cryogenic reconstructions of massive ice formations widely distributed in the late Quaternary deposits in Eastern Chukotka.

Citation: Vasil'chuk Yu.K., Chizhova Ju.N., Maslakov A.A., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C. Oxygen and hydrogen isotope variations in a recently formed massive ice at the mouth of the Akkani River, Eastern Chukotka. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018. 58 (1): 78–93. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-78-93

Поступила 16 августа 2017 г.

Принята к печати 22 ноября 2017 г.

Ключевые слова: Восточная Чукотка, изотопы водорода, изотопы кислорода, многолетнемёрзлые породы, морское побережье, пластовые льды, погребённый лёд, посёлок Лаврентия, пролювий, река Чульхевеем.

Изучен изотопный состав кислорода и водорода мощного современного (голоценового) ледяного пласта, погребённого под слоем пролювиальных отложений на побережье Чукотки вблизи посёлка Лаврентия. Значения δ¹⁸О и δ²Н во льду довольно однородны и составляют –17,1 и –128,3‰ соответственно. Изученный пластовый лёд в устье р. Аккани представляет собой захороненный перелетовывающий снежник, сформировавшийся с участием поверхностных вод и атмосферной влаги весенне-летнего периода.

Введение

Задачи настоящей работы — получение изотопной записи погребённого пласта льда, захороненного, как мы полагаем, относительно недавно под пролювиальным конусом выноса, а также сравнение изотопных характеристик пласта с распределением δ^{18} O, δ^2 H и d_{ехс} в толще современного снежника. Пластовые льды относятся к одному из самых интересных и сложных для правильной генетической идентификации криогенных объектов. У многих исследователей может сложиться впечатление, что пластовые ледяные залежи — довольно рутинный объект,

весьма обычный для многолетнемёрзлых толщ. Поэтому и объяснение их происхождения, как правило, ищут среди обычного сочетания криогенных процессов. Между тем, даже на участках массового распространения пластовых залежей (например, Бованенковское месторождение на Ямале или долина р. Маккензи в Канаде) пластовый лёд вскрывается лишь в 1-2% пробуренных скважин. Если при этом учитывать, что и скважинами, и обнажениями вдоль берегов морей, крупных рек и озёр вскрываются толщи, формировавшиеся не менее 30 тыс. лет, то становится понятно, что условия, благоприятные для формирования пластовых залежей даже в пределах 1% территории криолитозоны, возникают далеко не каждую тысячу лет, тогда как условия для обычного образования криогенных толщ появляются ежегодно. Поэтому для выяснения генезиса той или иной пластовой ледяной залежи с методической точки зрения правильнее исследовать сочетание экзогенных и криогенных процессов (а иногда, но гораздо реже, и эндогенных).

Долгое время считалось, что пластовые залежи в многолетнемёрзлых породах — реликты четвертичного оледенения. С середины 1950-х годов появляется всё больше свидетельств об их внутригрунтовом происхождении. И.А. Лопатин в низовьях р. Енисей описал выходы пластовых льдов мощностью до 4 м и отнёс их к погребённым снежникам или льдинам. И.А. Лопатин [1] так описал многоярусные пластовые залежи: «Лед образует пласты от частей вершка до 2-х и более аршин толщиною (*1 аршин* = *71 см* – *прим. Ю.В.*), слои и чечевицы льда переслаиваются с мерзлыми илистыми слоями, образуя целые свиты».

Пластовые ледяные залежи на Чукотке исследовались в 1930-е годы в районе посёлка Анадырь и бухты Угольная. Из наиболее интересных залежей отмечено двухъярусное залегание пластового льда, вскрытого вблизи мерзлотной станции. Ледяной пласт нижнего яруса имел мощность 5 м, а пласт верхнего яруса – 4 м [2, 3]. В 1950–60-е годы пластовые льды изучалась Б.И. Втюриным [4] и Ш.Ш. Гасановым [5] в долине р. Анадырь на побережье залива Креста и Мечигменского залива, в Уэленской низине, на побережье Колючинской губы, в приморской части Нижне-Анадырской низменности. А.К. и Ю.К. Васильчук в конце 1980-х годов исследовали позднеплейстоценовую пластовую ледяную залежь на берегу оз. Коолень, а также сезонные инъекционно-сегрегационные льды вблизи пос. Лаврентия и получили сведения о бурении засолённой пластовой залежи мощностью около 1,5 м на мелководье Мечигменского залива при его глубине более 10 м.

Чаще всего используемый критерий для идентификации природы ледяных залежей – их морфология. Особенно наглядны складки и деформации самого ледяного тела и вмещающих льды слоистых отложений, которые по сложившейся традиции интерпретируются как глетчерная природа льда. Однако при промерзании отложений могут возникать криогенные деформации слоистости в результате изменения объёма промерзающих пород и возникающих при этом огромных напряжениях. Кроме того, и в криолитозоне, и вне её широко известны деформации оползания как на склонах в субаэральных условиях, так и на подводных склонах. Наконец, и вертикальные, и горизонтальные тектонические движения сминают в складки и мёрзлые, и талые отложения, и даже полускальные метаморфические породы. Поэтому наличие складок любого типа в самой залежи и во вмещающих её отложениях не служит гарантированным индикатором природы ледяной залежи.

Для оценки природы пластовых ледяных залежей важный критерий — приуроченность самых крупных массивов к территориям низменностей, которые в позднем плейстоцене испытывали влияние морских трансгрессий. Это п-ова Югорский, Ямал, Гыданский, Таймыр, Чукотка, Новосибирские о-ва, север Юкона, дельта р. Маккензи, острова Канадского Арктического архипелага. Очень редки пластовые залежи на севере, в центральной части и на юге Якутии, в пределах Магаданской области, на Аляске (вне побережий), в Монголии, Китае и т.п.

Исследование стабильных изотопов в пластовых льдах — один из сравнительно простых методов при отборе образцов и анализе их изотопного состава, но вместе с тем тонкий и сложный метод на стадии интерпретации данных. Изотопная характеристика пластового льда на Чукотке получена для ледяных залежей берега оз. Коолень, долины р. Амгуэма, на р. Танюрер, вблизи г. Анадырь, и на побережье зал. Онемен [6–12]. Важнейшие задачи для криогенетической диагностики пластовых ледяных залежей — поиск их изотопных аналогов и изучение зависимостей $\delta^{18}O - \delta^2 H$, а также $\delta^2 H - d_{exc}$, которые можно использовать для установления источника воды и условий образования сложных пластовых залежей.

Местоположение района исследований

Обнажение пластового льда расположено (65°30'28,4" с.ш., 171°11'50,2" з.д.) недалеко от пос. Лаврентия в 2 км к юго-востоку от устья р. Чульхевеем (Аккани) на побережье Берингова моря (Мечигменский залив) в 25 м от береговой линии (рис. 1) и в 1 км к северо-востоку от базы морских охотников Аккани. Вся территория Чукотки находится в зоне распространения многолетнемёрзлых пород (ММП), которые отсутствуют только под озёрами и реками. Для Чукотки характерны практически все геоморфологические процессы, связанные с ММП: солифлюкция, вспучивание грунтов, образование пятенмедальонов, полигонов, каменных колец и пр. Согласно Т.Н. Каплиной [13], «наличие многолетнемерзлых пород ускоряет движение грунтовых масс на склонах». На южных склонах гор Чукотки наиболее интенсивно протекает делювиальный процесс — смыв, интенсивность которого обусловлена отсутствием леса в условиях влажного климата.

В верховьях р. Амгуэма интенсивный термокарст отмечен на склонах долины, образованных рыхлыми льдистыми отложениями. Практически на всех склонах можно ожидать проявления солифлюкции и термокарста с последующим формированием осыпей. Оползание осыпей происходит весьма интенсивно из-за значительного протаивания ММП, физического выветривания, действия грунтовых вод из-под распространённых здесь снежников, которые тают в течение лета. Ещё одна характерная черта Чукотки — широкое распространение летних снежников. Фирновые снежники приурочены также



Рис. 1. Расположение исследованного ледяного пласта (синий овал) в устье р. Аккани вблизи пос. Лаврентия (Восточная Чукотка)

Fig. 1. Location of the investigated ice layer (blue oval) at the mouth of the Akkani River near Lavrentiya village (Eastern Chukotka)



Рис. 2. Ледяной пласт в устье р. Аккани вблизи пос. Лаврентия (Восточная Чукотка). Фото А.А. Маслакова **Fig. 2.** Massive ice at the mouth of the Akkani River near Lavrentiya village (Eastern Chukotka). Photo by A.A. Maslakov

к впадинам на склонах гор, а в Ванкаремской низменности они встречаются в глубоких и обширных выемках в рыхлой толще. Наиболее характерны различные весенне-летние снежники, среди которых довольно много перелетовывающих. В тёплые годы многие перелетовывающие снежники стаивают, но затем вновь образуются на том же месте. Перелетовывающие снежники сосредоточены в глубоких долинах, особенно закрытых с юга сопками, на подножиях склонов невысоких возвышений (например, делювиально-солифлюкционных террасовидных шлейфах), в глубоких западинах на высоких склонах, на склонах к озёрам, рекам и морю [14].

Оледенение Чукотки насчитывает 38 ледников [15]. Климатические условия существования ледников Чукотского нагорья достаточно разнообразны — от субарктического морского (ледники бухты Лаврентия) до субарктического континентального (бассейн р. Амгуэма) и арктического (на Крайнем Севере). Важную роль играет сильный ветер в зимний сезон, который формирует мощный метелевый перенос, благодаря которому существуют ледники небольшой площади [15].

Строение ледяного пласта

Мощный и сравнительно протяжённый пласт льда шириной 45 м и толщиной до 2,7 м вскрыт в термоцирке шириной 50 м с высотой стенок до 4,5 м. Форма цирка сложная: он состоит из четырёх небольших кулуаров (рис. 2). Лёд во всём

массиве чистый, пузырчатый. Пузырьки воздуха имеют изометричную форму и достигают 3-5 мм в диаметре (рис. 3, *a*). При таянии обнажения на поверхности льда проступают следы слоистости, связанные, по-видимому, с более быстрым вытаиванием прослоев с глинистыми частицами. При зачистке льда прослои видны лишь в нескольких местах. В краевой части лёд чистый, прозрачный (см. рис. 3, б). Вытаивание льда здесь происходит неравномерно из-за присутствия прослоев примесей грунта во льду. На контакте ледяного пласта с перекрывающими отложениями (см. рис. 3, в) рыжеватый суглинок с включениями гальки переходит в сизый. Граница между льдом и перекрывающими его отложениями ровная, чёткая. На контакте с перекрывающей породой вверху лёд чистый, прозрачный (см. рис. 3, г), размер пузырьков воздуха здесь 2-4 мм.

Отложения, перекрывающие залежь, представлены валунным тёмно-палевым и сизым суглинком (см. рис. 3, *в*). Текстура тёмно-палевого суглинка — плитчатая, иногда встречаются следы слоистости и примазок охристого суглинка. Сизый суглинок приурочен к подошве слоя перекрывающих отложений и имеет максимальную мощность (2,1 м) в центральной части обнажения; сизый суглинок бесструктурный, изредка содержит прослои и гнёзда чёрного торфа. Контакт пород со льдом ровный, чёткий, несогласный. Криогенная текстура вблизи контакта косая линзовидная, толщина шлиров — до 3 мм, длина — до 5 см. В обнажении описаны три расчистки (рис. 4).



Рис. 3. Фрагменты ледяного пласта в устье р. Аккани вблизи пос. Лаврентия (Восточная Чукотка) Фото А.А. Маслакова.

а — пузырчатый лёд, распространённый практически по всему пласту; *б* — краевая часть пласта; *в* — контакт пласта с перекрывающими отложениями (наконечник лопаты упирается в кровлю пласта льда); *г* — пузырчатый лёд вверху на контакте с перекрывающей породой.

Fig. 3. Fragments of the massive ice at the mouth of the Akkani River near Lavrentiya village (Eastern Chukotka). Photo by A.A. Maslakov.

a – bubble ice, widespread almost throughout the formation; δ – the marginal part of the massive ice; e – contact of the formation with overlapping sediments (the tip of the shovel rests against the roof of the ice sheet); e – bubble ice at the top on contact with the overlapping rock

Расчистка № 1:

0-2,6 м – суглинок тёмно-палевый, тугопластичный, с включениями гальки и валунов (20-30%) и редким включением корней растений; нижние 5 см мёрзлые, с тонкошлировой линзовидной косой криогенной текстурой, контакт со льдом ровный, чёткий, несогласный; 2,6-3,0 м – лёд чистый, пузырчатый, пузыри имеют изометричную форму, диаметр 3–5 мм. *Расчистка № 2*:

0-0,9 м – суглинок тёмно-палевый и тёмносерый, тугопластичный, с включениями гальки, щебня и валунов (20-50%), имеет плитчатую структуру; встречаются включения современных



Рис. 4. Схема опробования ледяного пласта в устье р. Аккани вблизи пос. Лаврентия (Восточная Чукотка). *1* – суглинок тёмно-палевый, тугопластичный, с включениями галечника, валунов и редкими включениями растительных остатков; *2* – суглинок серосизый, тугопластичный, с включениями галечника и валунов, бесструктурный; *3* – лёд чистый, пузырчатый, с горизонтальной структурой; *4* – осыпи и оплывины; *5* – эрозионные врезы во льду; *6* – линейные размеры (м) и места отбора проб льда (кружки); *7* – номера расчисток

Fig. 4. Scheme of sampling the massive ice at the mouth of the Akkani River near the Lavrentiya village (Eastern Chukotka).

1 -loam dark-pale, turgid, with inclusions of pebbles and boulders and rare inclusions of plant residues; 2 -loam grayish, turgid, with inclusions of pebbles and boulders, structureless; 3 -ice is clean, bubbly, with a horizontal structure; 4 -talus and mud; 5 -erosion cuts in ice; 6 -linear dimensions (m) and sampling points of ice (circles); 7 -excavated trench number

корней, пятна ожелезнения (см. рис. 3, *в*); подошва слоя ровная, плавная;

0,9–3,0 м – суглинок сизый, тугопластичный, с включениями валунов, гальки и щебня (20–50%), бесструктурный; встречаются прослои и гнёзда (диаметр до 10 см) чёрного и бурого торфа; в основании отложения мёрзлые, криогенная текстура и граница со льдом аналогичны расчистке № 1;

3,0-4,7 м — лёд чистый, пузырчатый; структура слоистая, обусловлена вытаиванием прослоев с содержанием пылеватых частиц; между расчистками № 2 и 3 прослои суглинка достигают 5-6 см в ширину; слоистость несогласная с кровлей льда, изменение содержания пузырьков по разрезу не отмечено.

Расчистка № 3:

0-1,1 м — суглинок палевый, тугопластичный, с включениями щебня и валунов, слоистый, с пятнами ожелезнения и прослойками бурого суглинка; встречаются редкие гнёзда чёрного торфа; граница с нижележащим слоем ровная, плавная;

1,1-2,8 м — суглинок сизый, тугопластичный, с включениями гальки и валунов, бесструктурный;

2,8-4,1 м – лёд чистый, пузырчатый, аналогичный льду из расчистки № 2.

Методика опробования и аналитических определений

Образцы льда отбирались путём предварительной зачистки стенки обнажения и скалывания льда топором в двойной целлофановый пакет. Собранные образцы растапливали при комнатной температуре одни сутки, а затем разливали во флаконы. Органический материал также помещался в целлофановые пакеты, размораживался и просушивался при комнатной температуре. Линейные измерения обнажения проводились рулеткой с точностью до 10 см.

Измерения изотопного состава кислорода и водорода льда выполнены в режиме постоянного потока гелия (CF-IRMS) на масс-спектрометре Delta-V с использованием комплекса газ-бенч в изотопной лаборатории географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Изотопный состав выражается в $\delta(\%)$ относительно среднеокеанической воды V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). Для калибровки измерений использовались международные стандарты V-SMOW, GISP, SLAP, собственный лабораторный стандарт МГУ – снег ледника Гарабаши ($\delta^{18}O = -15,60\%$, $\delta^{2}H = -110,0\%$). Погрешность определений составила $\pm 0,6\%$ для $\delta^{2}H$ и $\pm 0,1\%$ для $\delta^{18}O$. Химический анализ выполнен на ионном хроматографе «Стайер» в химико-аналитическом центре географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Методический подход к интерпретации изотопных данных $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ и d_{exc}

После того, как В. Дансгором было предложено использовать дейтериевый эксцесс $d_{evc} = \delta^2 H - 8 \delta^{18} O$ в качестве дополнительного параметра неравновесности в процессе формирования атмосферных осадков [16], этот параметр был применён для изучения условий в источнике пара [17], неравновесной конденсации твёрдых осадков – снега в Антарктиде [18], влияния подоблачного испарения и вклада внутриконтинентальной испарившейся влаги [19, 20]. Использование дейтериевого эксцесса правомерно для всех процессов, происходящих с атмосферной влагой; d_{ехс} рассчитывается, исходя из наклона линии Крейга = $8(\delta^2 H = 8\delta^{18} O + 10)$ [21]. Закономерное распределение изотопного состава атмосферных осадков на диаграмме $\delta^{18}O - \delta^2 H$ вдоль линии Крейга называется также глобальной линией метеорных вод (ГЛМВ), её наклон обусловлен коэффициентами фракционирования в системе пар—жидкость: $S = \ln \alpha_{2H} / \ln \alpha_{18O} \approx 8$, где α — коэффициенты фракционирования. В процессе формирования льда значения δ^2 Н и δ^{18} О определяются величинами коэффициентов фракционирования в системе жидкость—лёд, и использование коэффициентов α_{π ёд-жидкость</sub>, полученных [22–24] в идеальных условиях для конжеляционного льда, даёт наклон $S = \ln \alpha_{2H} / \ln \alpha_{18O}$ от 6,18 до 7,3.

Если замерзание воды происходит в условиях закрытой системы (без подтока влаги), т.е. происходит замерзание ограниченного объёма воды, то изотопные характеристики льда будут меняться, следуя изотопному исчерпанию по модели Релея, и на диаграмме $\delta^{18}O - \delta^2 H$ будут располагаться вдоль линии с наклоном от 6 до 7,3 (рис. 5, а). Поскольку дейтериевый эксцесс всегда рассчитывается по формуле В. Дансгора (наклон $\Gamma \Pi MB = 8$), величина дейтериевого эксцесса будет занижаться для образцов начальных порций льда и завышаться для образцов льда последних фракций закрытой системы (что собственно и создаёт в конечном итоге наклон соединяющей линии соотношения $\delta^{18}O \delta^2$ Н в замерзающем льду существенно меньше 8, т.е. от 6 до 7,3). Это будет происходить исключи-



Рис. 5. Изотопное фракционирование, отражённое в изменении значений δ^{18} О и δ^{2} Н формирующегося льда, сопровождающее льдообразование в закрытой системе (*a*) – рассчитано с применением значений $\alpha_{\text{лед-жидкость}}$, полученных O'Neil (из [22]), и в условиях открытой системы (*б*).

Пунктирные линии – линейная аппроксимация значений; сплошная линия – линия метеорных вод

Fig. 5. Evolution of δ^{18} O and δ^{2} H values in ice during equilibrium freezing of water in a closed system (*a*) – was calculated using $\alpha_{ice-water}$ obtained by O'Neil (from [22]) and in an open system (δ).

The dotted lines show the linear approximation of the values, the solid line - Global Meteoric Water Line

тельно из-за разницы в наклонах линий аппроксимации и самой формулы расчёта d_{exc} , поэтому можно использовать соотношение $\delta^2 H - d_{exc}$, чтобы оценить, насколько величина d_{exc} определяется динамикой значений $\delta^2 H$.

Если лёд формируется в условиях открытой системы, т.е. с постоянным подтоком воды, или образуется небольшой объём льда из очень большого объёма воды, то изотопный состав льда будет наследовать изотопные характеристики воды, из которых он формируется, со сдвигом значений на величину є – разницу значений δ^{18} О (или δ^2 Н) между водой и льдом в условиях равновесия, которая определяется величиной α_{лёл-жилкость} (см. рис. 5, б). Лёд наследует изотопные значения атмосферных осадков, если не происходило перемещения воды внутри снежной толщи, выраженного метаморфизма или образования наложенного льда. Из такого распределения следует, что расположение фигуративных точек льда в координатах $\delta^{18}O - \delta^2 H$ отражает не только природу воды (метеогенную природу по соответствию ГЛМВ, изотопно-трансформированную воду по смещению значений относительно ГЛМВ – в основном это обусловлено процессами испарения, которые понижают наклон линии), но и процессы льдообразования.

Соотношение $\delta^2 H - d_{exc}$ может указывать либо на атмосферную природу льда (льдообразование в условиях открытой системы), либо на внутригрунтовое его формирование (льдообразование в условиях закрытой системы), т.е. замерзание ограниченного объёма воды. При образовании льда в условиях закрытой системы с наклоном линии на диаграмме $\delta^{18}O - \delta^2 H$ от 6 до 7 на диаграмме $\delta^2 H - d_{exc}$ будет выражена обратная зависимость d_{exc} от $\delta^2 H$. Если значения δ^{18} О и δ^{2} Н льда связаны коэффициентом 8, характерным для атмосферных осадков, то на диаграмме $\delta^2 H - d_{exc}$ точки будут располагаться вдоль горизонтальной линии – при меняющихся значениях $\delta^2 H$ величина d_{exc} будет оставаться относительно постоянной. Для атмосферных осадков также характерно полное отсутствие связи $\delta^2 H - d_{exc}$ (нет корреляции) или слабо положительная корреляция [25]. Использование соотношения значений $\delta^2 H {-} d_{exc}$ как диагностического инструмента условий льдообразования потенциально возможно для инфильтрационного, морского и некоторых типов подземных

льдов. В эксперименте по намораживанию льда из талой антарктической воды Р. Суше с Ж. Жузелем получили чётко выраженные изотопные эффекты, которые определили для полученного льда линейную обратную корреляцию значений $\delta^2 H$ и d_{exc} с коэффициентом достоверности линейной аппроксимации $R^2 = 0.95$ [26]. Практически идеальную линейную обратную зависимость значений d_{exc} от $\delta^2 H (R^2 = 0.99)$ получили Р. Суше с Ж. Жузелем и коллегами для образцов льда промёрзшего до основания небольшого озера в долине Тейлор на Земле Виктории в Антарктиде [27]. Д. Ласелль проинтерпретировал данные Р. Маккая по распределению значений δ^{18} О и δ^{2} Н в ледяном ядре пинго-20 на Аляске с точки зрения соотношения $\delta^2 H - d_{exc}$ и показал, что выраженная обратная зависимость величин d_{exc} от значений $\delta^2 H$ указывает на формирование льда в условиях закрытой системы [25].

Изотопный состав пластового льда

Вариации значений δ^{18} О и δ^{2} Н в образцах пластового льда в устье оказались весьма несущественными: величины δ^{18} О варьируют от -16,60 до -17,88‰, а δ^2 H - от -123,7 до -135,8‰ (табл. 1), изменение d_{ехс} также незначительно, хотя и более выраженное: от 4,2 до 15,76‰. Сравнение изотопного состава пластового льда в устье р. Аккани с вариациями значений δ^{18} О и $\delta^2 H$ в снежниках на разных высотах с горы Михаил вблизи г. Анадырь (табл. 2) показало почти полное сходство результатов и по значениям δ^{18} О, и по δ^{2} Н (сравни табл. 1 и 2), но не по величине d_{exc} . Соотношение значений $\delta^{18}O - \delta^2 H$ для образцов подземного льда в устье р. Аккани и снежника около Анадыря (рис. 6) показывает атмосферную природу льда, при этом заметно, что линия, аппроксимирующая изотопные значения снежника, имеет меньший наклон по сравнению с линией Крейга (ГЛМВ на рис. 6). Такое уменьшение наклона может быть связано с процессами метаморфизма снежной толщи, в результате которого внутри снежного покрова происходит диффузное разделение изотопов. Исследования снежного покрова в районе Фэрбенкса (Аляска) показали, что углы наклона от 2 до 5 характеризуют диффузный перенос воды как из почвы в вышележащий снежный покров, так и в пределах

		• •							
	Номер образца	Характеристика отбора проб	δ^{18} O, ‰	$\delta^2 H, \%$	d _{exc} , %0				
	Отбор по го	пбор по горизонтали на глубине 0,4 м от кровли пласта н							
	pace	тоянии от левого края пласта 0—61,8 м							
	16-M-69	0	-17,69	-134	7,52				
	16-M-70	2,3	-17,68	-129,2	12,24				
	16-M-71	4,0	-17,48	-127,5	12,34				
	16-M-72	5,8	-17,56	-129,6	10,88				
	16-M-73	7,8	-17,58	-130,6	10,04				
	16-M-74	10,0	-16,67	-123,7	9,66				
	16-M-75	11,8	-17,07	-129,1	7,46				
	16-M-76	14,4	-17,10	-129,8	10,7				
	16-M-77	17,2	-16,82	-124,7	9,86				
	16-M-78	20,2	-16,60	-122,6	10,2				
	16-M-79	23,4	-16,80	-121,9	12,5				
	16-M-80	25,4	-17,31	-130,5	7,98				
	16-M-81	27,7	-16,83	-128,4	6,24				
	16-M-82	31,7	-17,00	-126,3	9,7				
	16-M-83	34,7	-17,15	-126,1	11,1				
	16-M-84	38,4	-17,17	-121,6	15,76				
	16-M-85	41,4	-16,99	-127,3	8,62				
	16-M-86	44,4	-17,03	-127,3	8,94				
	16-M-87	47,4	-17,27	-127,3	10,86				
	16-M-88	50,4	-17,45	-130,5	9,1				
	16-M-89	53,4	-17,05	-127,3	9,1				
	16-M-90	56,4	-16,85	-126,6	8,2				
16-M-91 16-M-92		59,0	-16,96	-130,1	5,58				
		61,8	-17,88	-135,8	7,24				
	Отбор по	пбор по вертикали (0,7—4,2 м) на расстоянии 50,4 м от							
		левого края пласта							
16-M-93 16-M-94		0,7	-17,55	-134	6,4				
		1,1	-17,76	-135	7,08				
	16-M-95	1,4	-17,19	-127,3	10,22				
	16-M-96	1,8	-16,57	-124,2	8,36				
	16-M-97	2,1	-16,75	-129,8	4,2				
	16-M-98	2,5	-16,35	-125,2	5,6				
	16-M-99	2,8	-16,27	-125,6	4,56				
	16-M-100	3,5	-17,44	-131,2	8,32				
	16-M-101	4,2	-17,35	-128,4	10,4				

Таблица 1. Значения δ^{18} О, δ^{2} Н и d_{ехс} в образцах пластового льда, Восточная Чукотка, устье р. Аккани

нижних горизонтов снежного покрова [28]. Этим отличным от ГЛМВ соотношением объясняются и низкие значения d_{exc} в образцах снежника вблизи горы Михаил.

Образцы подземного льда в устье р. Аккани, отобранные по вертикали, также имеют меньший наклон относительно ГЛМВ. Это может ука-

Таблица 2. Вариации значений δ^{18} О, δ^{2} Н и d_{exc} в снежниках на разных высотах горы Михаил (20 м над ур. моря) вблизи г. Анадырь на Чукотке [25]

Номер образца	Глубина, м	$\delta^{18}O,$ ‰	$\delta^2 H, \%$	d _{exc} , %0
V-K-S-98/1	0,05-0,15	-16,91	-133,7	1,56
V-K-S-98/2	0,25-0,35	-16,49	-130,4	1,50
V-K-S-98/3	0,55-0,65	-17,27	-131,3	6,90
V-K-S-98/4	0,85-0,95	-17,25	-130,2	7,85
V-K-S-98/5	1,15-1,25	-17,32	-131,7	6,88
V-K-S-98/6	1,45-1,55	-16,08	-129,3	-0,66
V-K-S-98/7	1,65-1,75	-17,67	-136,4	4,92
V-K-S-98/8	1,85-1,95	-18,17	-142,2	3,12

зывать на то, что подземный лёд Аккани в основном представляет собой метаморфизованный снежник и что в его формировании, кроме снежных осадков, участвовали и поверхностные воды, которые могли в какой-то степени промачивать снег. На участие поверхностных вод в промачивании снежника указывает и довольно высокая плотность обследованного льда. На Чукотке поверхностный сток характеризуется соотношением $\delta^2 H \approx 6\delta^{18}O - 22,7$, диапазоном значений $\delta^{18}O$ от -11,2 до -16,38% и $\delta^2 H$ от -89,46 до -121,41% [29]. При этом логично предположить, что сам снежник (до промачивания водой) был сформирован зимними осадками, поэтому значения $\delta^{18}O$ и $\delta^2 H$ были заметно ниже.

Отсутствие корреляции значений $\delta^2 H$ и d_{exc} (рис. 7) для образцов горизонтального отбора указывает на атмосферную природу льда (уточним, что об атмосферной природе воды свидетельствует как отсутствие корреляции, так и положительная корреляция этих параметров). Слабая отрицательная зависимость значений d_{exc} от δ^2 H (см. рис. 7) для образцов льда вертикального отбора может говорить о том, что в промоченном водой снежнике (можно предположить, что промачивание водой происходило в нижних горизонтах) при его промерзании и захоронении льдообразование протекало в условиях закрытой системы, в результате чего фиксируется слабое изотопное фракционирование. Подобную зависимость мы отмечали при льдообразовании на Полярном Урале, где формирование наложенного льда и замерзание воды в порах нерастаявшего фирна отражались в отрицательной зависимости значений d_{exc} от $\delta^2 H$ в образцах льда присклоновых ледничков [30].



Рис. 6. Соотношение значений $\delta^{18}O - \delta^2 H$ для образцов подземного льда р. Аккани (*a*) и снежника вблизи г. Аналырь (*б*):

подземный лёд р. Аккани: 1 – горизонтальный отбор (уравнение *a*); 2 – вертикальный отбор (уравнение *b*); 3 – снежник (уравнение *b*); пунктирные линии – линейная аппроксимация значений, сплошная линия – глобальная линия метеорных вод **Fig. 6.** δ^{18} O- δ^{2} H relation for the samples of Akkani massive ground ice (*a*) and the snow pit near Anadyr' town (δ): massive ice near Akkani: 1 – horizontal selection (equation *a*); 2 – vertical selection (equation δ); 3 – snow pit near Anadyr' (equation *b*); the dotted lines show the linear approximation of the values, the solid line – Global Meteoric Water Line



Химическая характеристика льда

Содержание водорастворимых солей в пластовом льду (табл. 3) колеблется от 25,78 до 224,49 мг/л, в среднем оно составляет 62,45 мг/л. Наиболее высокие значения минерализации за**Рис. 7.** Соотношение значений $\delta^2 H - d_{exc}$ для образцов подземного льда р. Аккани и снежника вблизи г. Анадырь:

подземный лёд р. Аккани: 1 – горизонтальный отбор (уравнение *a*); 2 – вертикальный отбор (уравнение *б*); 3 – снежник вблизи г. Анадырь (уравнение *в*); пунктирными линиями показана линейная аппроксимация значений

Fig. 7. Relation between $\delta^2 H$ and d_{exc} from Akkani massive ground ice and snow pit near Anadyr':

massive ice near Akkani: 1 -horizontal selection (equation *a*); 2 -vertical selection (equation δ); 3 -snow pit near Anadyr' (equation *s*); the dotted lines show the linear approximation of the values

фиксированы на расстоянии 34,7—47,4 м от левого края ледяной залежи (рис. 8). Преобладают гидрокарбонат-ион и ион кальция, что типично для осадков. Среднее содержание составляет, ммоль/л: гидрокарбонат-иона — 0,79, ионов кальция — 0,63, калия — 0,04, натрия — 0,11, маг-

Номер	Глубина	Содержание, ммоль/л (мг/л)				$C1 = /SO^{2} =$	Минерализа-				
образца	отбора, м*	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO_3^-	SO4 ²⁻	HCO ₃ ⁻	$10^{-1}/30_{4^{-2}}$	ция, мг/л
16-M-69	0	0,12 (2,87)	0,06 (2,35)	0,14 (1,65)	0,52 (10,37)	0,07 (0,64)	0,01 (0,67)	0,23 (10,88)	0,54 (33,17)	0,31	64,43
16-M-70	2,3*	0,95 (21,90)	0,08 (2,95)	0,31 (3,70)	0,65 (12,95)	0,64 (22,45)	0,04 (2,36)	0,81 (38,80)	0,53 (32,57)	0,79	137,68
16-M-73	7,8*	0,22 (5,12)	0,05 (1,8)	0,07 (0,86)	0,25 (5,06)	0,11 (3,91)	0,04 (2,68)	0,12 (5,88)	0,36 (21,91)	0,91	47,22
16-M-74	10*	0,10 (2,31)	0,02 (0,96)	0,13 (1,52)	0,74 (14,87)	0,06 (2,00)	0,04 (2,20)	0,04 (2,10)	0,89 (54,55)	1,31	80,51
16-M-76	14,4*	0,02 (0,41)	0,002 (0,10)	0,02 (0,20)	0,10 (1,90)	0,01 (0,45)	0,004 (0,27)	0,01 (0,60)	0,11 (6,51)	1,03	10,44
16-M-77	17,2*	0,06 (1,45)	0,02 (0,71)	0,06 (0,70)	0,51 (10,14)	0,03 (1,10)	0,02 (1,48)	0,02 (1,00)	0,59 (36,25)	1,51	52,83
16-M-80	25,4*	0,07 (1,60)	0,03 (1,31)	0,06 (0,70)	0,23 (4,64)	0,04 (1,36)	0,01 (0,57)	0,03 (1,20)	0,33 (20,11)	1,55	31,49
16-M-82	31,7*	0,18 (4,17)	0,02 (0,92)	0,07 (0,81)	0,25 (4,93)	0,11 (3,87)	0,03 (1,66)	0,05 (2,20)	0,36 (22,11)	2,41	40,67
16-M-83	34,7*	0,33 (7,48)	0,11 (4,19)	0,27 (3,21)	2,06 (41,10)	0,12 (4,27)	0,08 (1,92)	0,11 (5,16)	2,53 (154,06)	1,13	224,39
16-M-86	44,4*	0,06 (1,29)	0,02 (0,63)	0,04 (0,54)	0,21 (4,16)	0,02 (0,70)	0,01 (0,40)	0,02 (1,15)	0,28 (16,95)	0,83	25,78
16-M-87	47,4*	0,05 (1,16)	0,05 (1,91)	0,13 (1,61)	2,05 (41,07)	0,02 (0,68)	0,02 (0,93)	0,01 (0,60)	2,26 (137,56)	1,55	185,52
16-M-88	50,4*	0,09 (2,00)	0,02 (0,93)	0,03 (0,37)	0,15 (3,00)	0,04 (1,56)	0,004 (0,25)	0,02 (0,80)	0,23 (14,05)	2,67	22,96
16-M-89	53,4*	0,05 (1,04)	0,02 (0,78)	0,05 (0,54)	0,31 (6,15)	0,03 (0,94)	0,01 (0,92)	0,01 (0,46)	0,38 (23,26)	2,80	34,09
16-M-90	56,4*	0,04 (1,03)	0,04 (1,68)	0,08 (0,96)	0,26 (5,10)	0,02 (0,69)	0,01 (0,91)	0,01 (0,58)	0,39 (23,85)	1,63	34,80
16-M-91	59*	0,13 (3,03)	0,03 (1,29)	0,06 (0,76)	0,42 (8,35)	0,08 (2,90)	0,07 (4,52)	0,03 (1,45)	0,53 (32,49)	2,74	54,79
16-M-92	61,8*	0,05 (1,21)	0,02 (0,78)	0,07 (0,87)	0,40 (8,03)	0,03 (0,95)	0,02 (1,09)	0,02 (0,89)	0,50 (30,56)	1,46	44,38
16-M-93	0,7	0,05 (1,10)	0,02 (0,64)	0,05 (0,58)	0,24 (4,73)	0,02 (0,53)	0,01 (0,43)	0,01 (0,40)	0,33 (19,86)	1,82	28,27
16-M-99	2,8	0,05 (1,16)	0,02 (0,85)	0,03 (0,41)	0,26 (5,18)	0,03 (0,95)	0,02 (1,44)	0,02 (0,90)	0,32 (19,49)	1,45	30,38
16-M-100	3,5	0,07 (1,54)	0,04 (1,42)	0,05 (0,60)	0,28 (5,59)	0,03 (1,13)	0,02 (1,27)	0,01 (0,27)	0,39 (24,09)	5,74	35,91

Таблица 3. Химический состав пластовой ледяной залежи в устье р. Аккани (Чукотка)

*Расстояние от левого края пласта, м

ния -0,1. Соотношение содержания хлоридов и сульфатов колеблется в пределах 0,31-2,80, что указывает на то, что вода, сформировавшая лёд, имеет, в основном, атмосферное происхождение, но лёд на расстоянии 31,3 и 50,4-53,4 м от левого края залежи демонстрирует возможное участие морских аэрозолей, поскольку характеризуется близкими значениями к соотношению этих ионов в воде залива Онемен (2,98). Отметим единственное существенное отклонение этого соотношения от атмосферного диапазона: для образца с глубины 3,5 м характерно соотношение хлоридов и сульфатов 5,74, при этом минерализация льда довольно низкая — 35,91 мг/л. Повышенная по сравнению с другими образцами концентрация солей отмечена для образцов № 16-М-83 и 16-М-87 — соответственно 224,39 и 185,52 мг/л (см. табл. 3). Образцы расположены



Рис. 8. Изменение минерализации ледяного пласта (*a*), колебания концентрации ионов кальция (*б*), изменение соотношения хлоридов к сульфатам (*в*) по горизонтали

Fig. 8. Mineralization of the ice formation (*a*), fluctuations in the concentration of calcium ions (δ), change in the ratio of chloride to sulfate (α) horizontally

примерно на одной глубине от кровли ледяной залежи. Повышение минерализации не отражается на химическом составе льда, лёд в основном ультрапресный, а в точке отбора № 16-М-83 пресный и относится к гидрокарбонатному классу группы натрия и кальция. Похожий состав отмечен С.М. Фотиевым [31] для сегрегационного льда на п-ове Ямал. Химическая характеристика льда, соотношение ионов хлора и сульфата, минерализация льда — все эти показатели отвечают химическому составу современных сегрегационных льдов, тундровых снежников и атмосферных осадков [10, 11, 31, 32].

Обсуждение

Современные отложения побережья Чукотки образуют пролювиальные конусы выноса в устьевых частях оврагов. Вероятнее всего именно таким конусом выноса и был захоронен изу-

ченный нами пласт льда, представлявший собой на ранних стадиях захоронения промоченный водой мощный снежник. Величины d_{exc} от 4,2 до 15,76% во льду в устье р. Аккани заметно выше по сравнению со снежником у Анадыря – от -0.66 до 7,85‰ (см. табл. 2) и позволяют предположить, что процессы метаморфизма снега были менее интенсивны. Вероятно, в промачивании снега, погребение которого под пролювиальными отложениями сформировало ледяную залежь, участвовали поверхностные воды. Этому не противоречат и значения минерализации, и химический состав льда: чуть большее содержание «континентальных» ионов кальция и гидрокарбонат-иона и увеличение общей минерализации в некоторых образцах льда может быть связано с добавлением поверхностных вод плоскостного смыва. Кроме того, на снежник могли выпадать дожди, когда захоронение снежника происходило летом и в снежную толщу просочились осадки тёплого периода. Атмосферные осадки вымывают примеси из атмосферы и, кроме морских аэрозолей, присутствие которых вблизи побережья закономерно, осаждают «континентальные» ионы, поступающие в атмосферу как правило весной, когда сходит снежный покров и поверхность почвы ещё не закреплена растительностью. Поэтому весенние дожди могут иметь довольно высокую минерализацию.

Изотопной характеристики атмосферных осадков по району исследований на сегодняшний день не существует. Для приблизительной оценки авторы использовали данные по среднемесячным значениям δ^{18} O и δ^{2} H осадков на близко расположенной станции Барроу на Аляске, где в 1962-1969 гг. велись постоянные наблюдения за изотопным составом по программе GNIP. Среднее значение δ^{18} O за весь период наблюдений составило -17,8%, а среднее значение $\delta^2 H = -131,7\%$ (https://nucleus.iaea.org). Эти значения очень близки к полученным в устье р. Аккани и в снежнике у Анадыря. Всё это заставляет предположить, что изученный лёд у р. Аккани - это современное образование, представляющее собой полное годовое накопление атмосферной влаги: а) накопление снега в зимний сезон, возможно с ветровым уплотнением, что в целом характерно для Чукотки; б) выпавшие на снег весенние и летние дожди; в) спустившиеся по уклону поверхности поверхностные воды. Подобной изотопной записи ещё не было сделано для Чукотки, для сравнения мы проанализировали изотопные данные по другим пластовым льдам этого региона.

В гомогенной позднеплейстоценовой внутригрунтовой инъекционно-сегрегационной пластовой залежи на восточной окраине Чукотки, на п-ове Дауркина в котловине оз. Коолень, значения δ^{18} О заметно ниже, чем в залежи у р. Аккани, и варьируют от -20,6 до -22,4‰. Однако во льду современного сезонного инъекционного бугра пучения значения δ^{18} О выше и изменяются от -13,4до -15,3‰ [11]. В гомогенной позднеплейстоценовой внутригрунтовой пластовой залежи у Анадыря вариации значений δ^{18} О невысокие и тоже ниже, чем у залежи вблизи р. Аккани: от -19,6 до -19,7‰, а в рассекающих её ледяных жилах диапазон вариаций δ^{18} О составляет около 5‰ (от -23,4 до -18,6%). Судя по сравнительно однородному изотопному составу льда в разных частях пластовой залежи и её позднеплейстоценовому возрасту, вероятен сегрегационный генезис в условиях открытой системы с подтоком влаги извне [11].

В гетерогенных аллохтонных и автохтонных пластовых залежах в долине р. Амгуэма перед выходом её на Ванкаремскую низменность диапазон величин δ^{18} О на многие метры по вертикали и горизонтали оказался незначительным - не более 4‰: от −29 до −25‰ [9], т.е. значения δ^{18} О существенно ниже, чем для залежи у р. Аккани. Согласно выводам изучавших их исследователей, большинство из встреченных здесь ледяных залежей либо погребены при осадконакоплении, либо сформировались в процессе одновременного накопления и промерзания отложений. Однако перьеобразные контакты некоторых залежей, указывающие на внутригрунтовую сегрегационную природу этих пластов, мы считаем весьма показательным. Кроме того, пласты здесь многоярусные, что также нельзя объяснить процессом погребения льда вблизи языка ледника. Эти пласты льда, скорее всего, имеют сегрегационную природу, а залежь в целом представляет собой гетерогенный парагенез аллохтонных и автохтонных пластовых ледяных залежей.

В гетерогенной аллохтонной пластовой залежи в долине р. Танюрер, на восточном склоне хр. Пекульней, значения δ^{18} О также ниже, чем для пласта у р. Аккани, и изменяются от -23,56 до -21,73‰, а значения δ^2 Н варьируют от -181,3 до -165,2‰. В плейстоценовых повторно-жильных льдах δ^{18} О изменяется от -24,90 до -21,29‰, а δ^2 Н в этих же образцах варьирует от -191,5 до -165,9‰. Это, наряду с криофациальным анализом пород, позволило А.Н. Котову отнести пластовые ледяные залежи к погребённым остаткам плейстоценового ледника [7]. В гомогенной автохтонной пластовой залежи на берегу залива Онемен значения δ^{18} О изменяются в очень широком диапазоне: от -12,85 до -20,7‰, а значения δ^2 H – от -155,2 до -114,3‰ [8]. Эта пластовая ледяная залежь сформировалась, скорее всего, сегрегационным путём, сопровождавшимся интенсивным фракционированием, приведшим к отмеченным различиям δ^{18} О и δ^2 H в одном пласте.

Изученная пластовая ледяная залежь в устье р. Аккани и её изотопно-геохимическая характеристика - первое описание мощного современного или голоценового погребённого пластового льда на Северо-Востоке России. Ранее в позднеголоценовых отложениях подобные современные пластовые льды встречены в устье р. Сабеттаяха на севере Ямала [33] и в долине р. Слайдр на о. Элсмир [34, 35]. Мы полагаем современный или голоценовый возраст изученной пластовой залежи, исходя из изотопных характеристик льда, сходных с современными атмосферными осадками и отличающихся от позднеплейстоценовых. Интересно, что на обширной территории криолитозоны России пластовые ледяные залежи встречены только на Ямале и Чукотке. В одном из самых изученных местоположений пластовых льдов на Ямале – в районе мыса Марре-Сале – в течение многолетних исследований были описаны, кроме изотопного состава и радиоуглеродного возраста [36], различия в кристаллической структуре пластовых льдов. Несмотря на то, что в мёрзлой толще мыса Марре-Сале выделены два типа льда по кристаллической структуре [37], оба они образовывались в условиях закрытой системы. Мы полагаем, что при захоронении снежника, промоченного водой, его последующее промерзание могло происходить в условиях закрытой системы, когда промёрзшие сверху отложения формировали фронт промерзания, направленный вниз, а ММП в основании снежника служили водоупором. Поэтому формирование как прозрачного, так и пузырькового льда могло иметь место при замерзании жидкой воды, которой был промочен снежник.

Выводы

Изучен мощный современный (голоценовый) ледяной пласт, погребённый под слоем пролювиальных отложений в устьевой части крупного оврага. Впервые охарактеризован изотопный состав кислорода и водорода голоценового погребённого пласта льда. Значения δ^{18} О и δ^{2} Н во льду довольно однородны и составляют в среднем -17,1 и -128,3% соответственно. Полученные данные могут быть использованы при криогенетических реконструкциях пластовых ледяных залежей, широко распространённых в позднечетвертичных отложениях Восточной Чукотки. Пластовый лёд в устье р. Аккани, скорее всего, имеет гетерогенное происхождение. Его формирование происходило при захоронении перелетовывающего снежника с участием поверхностных вод и атмосферной

Литература

- Лопатин И.А. Некоторые сведения о ледяных слоях в Восточной Сибири // Приложение № 1 к XXIX тому Записок Императорской Академии Наук (читано в заседании физико-математического отделения 18 мая 1876 года). СПб., 1876. С. 3–32.
- Соловьёв П.А. Лёд в вечномёрзлых грунтах в районе поселка Анадырь // Недра Арктики. 1947. Вып. 2. С. 213–232.
- Швецов П.Ф. Подземные воды и ископаемые льды района пос. Анадырь и бухты Угольной // Недра Арктики. 1947. Вып. 2. С. 204–211.
- 4. *Втюрин Б.И.* Криогенное строение четвертичных отложений (на примере Анадырской низменности). М.: Наука, 1964. 152 с.
- Гасанов Ш.Ш. Подземные льды Чукотского полуострова // Вечная мерзлота Чукотки. Магадан: изд. СВКНИИ СО АН СССР, 1964. С. 14–41.
- Котов АН. Позднеплейстоценовые криолитогенные отложения и глетчерные льды в долине р. Экитыки (северная Чукотка) // Комплексные исследования Чукотки (проблемы геологии и биогеографии). Магадан: изд. Чукот. филиала СВКНИИ СВНЦ ДВО РАН, 1999. С. 93–102.
- Котов А.Н. Криолитогенные гряды в долине р. Танюрер (Чукотка) // Криосфера Земли. 1998. Т. II. № 4. С. 62–71.
- Котов А.Н. Особенности залегания, состава и строения ледяных залежей пластового типа на северном побережье залива Онемен (Чукотка) // Материалы второй конф. геокриологов России: Т. 1. Ч. 2. Литогенетическая геокриология. Инженерная геокрио-

влаги весенне-летнего периода. Большая насыщенность снежника водой при промерзании отразилась в незначительном изотопном фракционировании, характерном для льдообразования в условиях закрытой системы.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 14-27-00083-П и бюджетного финансирования Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова с использованием масс-спектрометрического оборудования, приобретённого на средства Программы развития МГУ.

Acknowledgments. The work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 14-27-00083-P and budget financing of the Lomonosov's Moscow State University, the mass spectrometer purchased with funds of the MSU Development Program.

References

- 1. Lopatin I.A. Some information about the ice layers in Eastern Siberia. Prilozheniye № 1 k XXIX tomu Zapisok Imperatorskoy Akademii Nauk. Appendix № 1 to the XXIX of the Notes of the Imperial Academy of Sciences. SPb., 1876: 3–32. [In Russian]
- 2. *Solovyov P.A.* Ice in the permafrost soils near the village of Anadyr. *Nedra Arktiki*. Bowels of the Arctic. 1947, 2: 213–232. [In Russian].
- 3. *Shvetsov P.F.* Underground waters and fossil ice of the area of the Anadyr and Coal Bay. *Nedra Arktiki*. Bowels of the Arctic. 1947, 2: 204–211. [In Russian].
- 4. Vtyurin B.I. Kriogennoe stroenie chetvertichnykh otlozheniy (na primere Anadyrskoy nizmennosti). Cryogenic structure of quaternary deposits (on the example of the Anadyr lowland). Moscow: Nauka, 1964: 152 p. [In Russian].
- Gasanov Sh.Sh. Underground ice of the Chukchi Peninsula. Vechnaya merzlota Chukotki. Permafrost of Chukotka. Magadan: SO AN USSR, 1964: 14–41. [In Russian].
- Kotov A.N. Late Pleistocene cryolithogenic deposits and glacial ice in the valley of the river. Eketiki (northern Chukotka). Kompleksnye issledovaniya Chukotki (problemy geologii i biogeografii). Complex research of Chukotka (problems of geology and biogeography). Magadan: DVO RAN, 1999: 93–102. [In Russian].
- Kotov A.N. Cryolithogenic ridges in the valley of the Tanyurer River (Chukotka). Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere. 1998, II (4): 62–71. [In Russian].
- 8. *Kotov A.N.* Features of the occurrence, composition and structure of the massive ice deposits on the northern coast of Onemen Bay (Chukotka). *Materialyi vtoroy*

логия. МГУ имени М.В. Ломоносова, 6–8 июня 2001 г. М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 218–225.

- 9. *Королёв С.Ю*. Находка в долине р. Амгуэмы позднеплейстоценового глетчерного льда (Северная Чукотка) // ДАН. 1993. Т. 329. № 2. С. 195–198.
- Васильчук Ю.К., Котляков В.М. Основы изотопной геокриологии и гляциологии. М.: Изд-во МГУ, 2000. 616 с.
- Васильчук Ю.К. Изотопные методы в географии.
 Ч. 2: Геохимия стабильных изотопов пластовых льдов. В 2 т. Т. І. М.: Изд-во МГУ, 2012. 472 с.
- Vasil'chuk Yu.K., Murton J.B. Stable isotope geochemistry of massive ice // Geography, Environment, Sustainability. 2016. № 3 (9). P. 4–24. doi: 10.15356/2071–9388 03v09 2016 01.
- Каплина Т.Н. Особенности процессов сноса со склонов в области распространения многолетнемерзлых пород // Вопросы географии. 1959. Т. 46. С. 101.
- Кожевников Ю.П. Геосистемные аспекты растительного покрова Чукотки. Владивосток: изд. ДВО АН СССР, 1989. 308 с.
- 15. Ананичева М.Д., Маслаков А.А., Антонов Е.В. Деградация объектов криосферы в районе залива Лаврентия, Восточная Чукотка // Арктика и Антарктика. 2017. № 3. С. 17–29.
- Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. V. 16. P. 436–468.
- Jouzel J., Merlivat L., Lorius C. Deuterium excess in an East Antarctic ice core suggests higher relativity at the oceanic surface during the last glacial maximum // Nature. 1982. V. 299. P. 688–691.
- Jouzel J., Merlivat L. Deuterium and oxygen 18 in precipitation: modeling of the isotopic effects during snow formation // Journ. of Geophys. Research. 1984. V. 89. № 7. P. 11749–11757.
- Pang Z., Kong Y., Froehlich K., Huang T., Yuan L., Yuan L., Li Z., Wang F. Processes affecting isotopes in precipitation of an arid region // Tellus B. 2011. V. 63. P. 352–359.
- Wang S., Zhang M., Hoges C.E., Zhu X., Dong L., Ren Z., Chen F. Factors controlling stable isotope composition of precipitation in arid conditions: an observation network in the Tianshan Mountains, central Asia // Tellus B. 2016. V. 68. P. 26206
- Craig H. Isotope variation in meteoric waters // Science. 1961. V. 133. P. 1702–1703.
- O'Neil J.R. Hydrogen and oxygen fractionation between ice and water // Journ. of Phys. Chem. 1968. V. 72. P. 3683–3684.
- Suzuoki T, Kumura T. D/H and ¹⁸O/¹⁶O fractionation in ice-water systems // Mass Spectroscopy. 1973. V. 21. P. 229–233.
- 24. *Lehmann M., Siegenthaler U.* Equilibrium oxygen- and hydrogen-isotope fractionation between ice and water // Journ. of Glaciology. 1991. V. 37. № 125. P. 23–26.

konf. geokriologov Rossii. Materials of the second conf. of geocryologists of Russia. Moscow: MSU, 2001, 1 (2): 218–225. [In Russian].

- 9. *Korolyov S. Yu.* The find of late Pleistocene glacial ice in the valley of the Amguema river (Northern Chukotka). *Doklady Akademii Nauk.* Proc. of the Academy of Sciences. 1993, 329 (2): 195–198. [In Russian].
- Vasil'chuk Yu.K., Kotlyakov V.M. Osnovy izotopnoy geokriologii i glyatsiologii. Principles of Isotope Geocryology and Glaciology. Moscow: Moscow University Press, 2000: 616 p. [In Russian].
- 11. Vasil'chuk Yu.K. Izotopnye metody v geografii. Chast' 2: Geokhimiya stabil'nykh izotopov plastovykh l'dov. Isotope Ratios in the Environment. Part 2: Stable isotope geochemistry of massive ice. In 2 toms. T. 1. Moscow: Moscow University Press, 2012: 472 p. [In Russian].
- Vasil'chuk Yu.K., Murton J.B. Stable isotope geochemistry of massive ice. Geography, Environment, Sustainability. 2016, 3 (9): 4–24. doi: 10.15356/2071– 9388_03v09_2016_01.
- 13. *Kaplina T.N.* Features of demolition processes from slopes in the area of permafrost distribution. *Voprosy geografii*. Problems of Geography. 1959, 46: 101. [In Russian].
- Kozhevnikov Yu.P. Geosistemnye aspekty rastitel'nogo pokrova Chukotki. Geosystemic aspects of the vegetation cover of Chukotka. Vladivostok: DVO AN SSSR, 1989: 308 p. [In Russian].
- 15. Ananicheva M.D., Maslakov A.A., Antonov E.V. Degradation of cryospheric objects in the area of the Laurentia Bay, Eastern Chukotka. Arktika i Antarktika. Arctic and Antarctic. 2017, 3: 17–29. [In Russian].
- 16. *Dansgaard W*. Stable isotopes in precipitation. Tellus. 1964, 16: 436–468.
- 17. *Jouzel J., Merlivat L., Lorius C.* Deuterium excess in an East Antarctic ice core suggests higher relativity at the oceanic surface during the last glacial maximum. Nature. 1982, 299: 688–691.
- Jouzel J., Merlivat L. Deuterium and oxygen 18 in precipitation: modeling of the isotopic effects during snow formation. Journ. of Geophys. Research. 1984, 89 (7): 11749–11757.
- Pang, Z., Kong, Y., Froehlich, K., Huang, T., Yuan, L., Yuan L., Li Z., Wang F. Processes affecting isotopes in precipitation of an arid region. Tellus B. 2011, 63: 352–359.
- Wang S., Zhang M., Hoges C.E., Zhu X., Dong L., Ren Z., Chen F. Factors controlling stable isotope composition of precipitation in arid conditions: an observation network in the Tianshan Mountains, central Asia. Tellus B. 2016, 68 (1): 26206.
- 21. *Craig H.* Isotope variation in meteoric waters. Science. 1961, 133: 1702–1703.
- O'Neil J.R. Hydrogen and oxygen fractionation between ice and water. Journ. of Phys. Chem. 1968, 72: 3683–3684.
- 23. *Suzuoki T., Kumura T.* D/H and ¹⁸O/¹⁶O fractionation in ice-water systems. Mass Spectroscopy. 1973, 21: 229–233.
- 24. *Lehmann M., Siegenthaler U.* Equilibrium oxygen- and hydrogen-isotope fractionation between ice and water. Journ. of Glaciology. 1991, 37 (125): 23–26.

- 25. *Lacelle D*. On the δ^{18} O, δ D and d-excess relations in meteoric precipitation and during equilibrium freezing: Theoretical approach and field examples // Permafrost and Periglacial Processes. 2011. V. 22. P. 13–25.
- 26. Souchez R., Jouzel J., Lorrain R., Sleewaegen S., Stievenard M., Verbeke V. A kinetic isotope effect during ice formation by water freezing // Geophys. Research Letters. 2000. V. 27. № 13. P. 1923–1926.
- 27. *Souchez R., Jouzel J.* On the isotopic composition in δD and δ¹⁸O of water and ice during freezing // Journ. of Glaciology. 1984. № 30 (106). P. 369–372.
- 28. Friedman I., Benson C., Gleason J. Isotopic changes during snow metamorphism // Stable isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein. The Geochemical Society, Spesial Publication. 1991. № 3. P. 211–221.
- 29. Поляк Б.Г., Дубинина Е.О., Лаврушин В.Ю., Чешко А.Л. Изотопный состав воды гидротерм Камчатки // Литология и полезные ископаемые. 2008. № 5. С. 480-504.
- 30. Чижова Ю.Н., Васильчук Ю.К. Дейтериевый эксцесс в снеге и ледниках Полярного Урала и пластовых льдах юга Ямала и побережья Байдарацкой губы // Арктика и Антарктика. 2017. № 2. С. 100–111.
- 31. *Фотиев С.М.* Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли. 1999. Т. 3. № 2. С. 40–65.
- Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Повторно-жильные льды долины реки Майн и реконструкции зимних палеотемператур воздуха Южной Чукотки 38–12 тыс. лет назад // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 5. С. 27–41.
- Vasil'chuk Yu., Budantseva N., Vasil'chuk A., Chizhova Ju., Podborny Ye., Vasil'chuk J. Holocene multistage massive ice, Sabettayakha river mouth, Yamal Peninsula, northernwest Siberia // GeoResearch Journ. 2016. V. 9. P. 54–66. doi: org/10.1016/j.grj.2016.09.002.
- 34. *Pollard W., Bell T.* Massive ice formation in the Eureka Sound Lowlands: A landscape model // Proc. of the Seventh Permafrost Intern. Conf. Yellowknife, Canada / Eds.: A.G. Lewkowicz, M. Allard. Universite Laval, Collection Nordicana, Canada. 1998. № 57. P. 903–908.
- 35. Robinson S., Pollard W. Massive ground ice within Eureka Sound bedrock, Fosheim Peninsula, Ellesmere Island, N.W.T. // Permafrost. Seventh Intern. Conf. Proceedings. Yellowknife, Canada / Eds.: A.G. Lewkowicz, M. Allard. Universite Laval, Collection Nordicana, Canada. 1998. № 57. P. 949–954.
- 36. Опокина О.Л., Слагода Е.А., Курчатова А.Н. Стратиграфия разреза «Марре-Сале» (Западный Ямал) с учётом новых данных радиоуглеродного анализа // Лёд и Снег. 2015. Т. 55. № 4. С. 87–94.
- 37. Слагода Е.А., Опокина О.Л., Рогов В.В., Курчатова А.Н. Строение и генезис подземных льдов в верхненеоплейстоцен-голоценовых отложениях мыса Марре-Сале (Западный Ямал) // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 2. С. 9–22.

- 25. *Lacelle D*. On the δ^{18} O, δ D and d-excess relations in meteoric precipitation and during equilibrium freezing: Theoretical approach and field examples. Permafrost and Periglacial Processes. 2011, 22: 13–25.
- 26. Souchez R., Jouzel J., Lorrain R., Sleewaegen S., Stievenard M., Verbeke V. A kinetic isotope effect during ice formation by water freezing. Geophys. Research Letters. 2000, 27 (13): 1923–1926.
- 27. Souchez R., Jouzel J. On the isotopic composition in δD and $\delta^{18}O$ of water and ice during freezing. Journ. of Glaciology. 1984, 30 (106): 369–372.
- Friedman I., Benson C., Gleason J. Isotopic changes during snow metamorphism. Stable isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein. The Geochemical Society, Spesial Publication. 1991, 3: 211–221.
- 29. Polyak B.G., Dubinina E.O., Lavrushin V.Yu., Cheshko A.L. Isotope composition of water of the hydrotherm of Kamchatka. Litologiya i poleznye iskopaemye. Lithology and Mineral Resources. 2008, 5: 480–504. [In Russian].
- 30. *Chizhova Ju.N., Vasilchuk Yu.K.* Deuterium excess in the snow and glaciers of the Polar Urals and the massive ice of the south of Yamal Peninsula and the coast of the Baydaratskaya Bay. *Arktika i Antarktika.* Arctic and Antarctic. 2017, 2: 100–111. [In Russian].
- Fotiev S.M. Regularities in the formation of the ion-salt composition of the natural waters of Yamal Peninsula. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 1999, 3 (2): 40– 65. [In Russian].
- Vasilchuk Yu.K., Vasilchuk A.C. Ice wedges in the Mayn River Valley and winter air palaeotemperature in the Southern Chukchi Peninsula at 38–12 Kyr BP. *Kri*osfera Zemli. Earth's Cryosphere. 2017, 21 (5): 27–41. [In Russian].
- Vasil'chuk Yu., Budantseva N., Vasil'chuk A., Chizhova Ju., Podborny Ye., Vasil'chuk J. Holocene multistage massive ice, Sabettayakha river mouth, Yamal Peninsula, northernwest Siberia. GeoResearch Journ. 2016, 9: 54–66. doi: org/10.1016/j.grj.2016.09.002.
- 34. Pollard W., Bell T. Massive ice formation in the Eureka Sound Lowlands: A landscape model. Proc. of the Seventh Permafrost Intern. Conf.. Yellowknife, Canada. Eds.: A.G. Lewkowicz, M. Allard. Universite Laval, Collection Nordicana. 1998, 57: 903–908.
- 35. Robinson S., Pollard W. Massive ground ice within Eureka Sound bedrock, Fosheim Peninsula, Ellesmere Island, N.W.T. Permafrost. Seventh International Conference. Proceedings. Yellowknife. Canada. Eds.: A.G. Lewkowicz, M. Allard. Universite Laval, Collection Nordicana. 1998, 57: 949–954.
- Opokina O.L., Slagoda E.A., Kurchatova A.N. Stratigraphy of the section «Marre-Sale» (Western Yamal Peninsula) with the new data of radiocarbon Dating. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2015, 55 (4): 87–94. [In Russian].
- Slagoda E.A., Opokina O.L., Rogov V.V., Kurchatova A.N. Structure and Genesis of underground ice in upperneo-Pleistocene – Holocene sediments of the Cape Marre-Sale (Western Yamal Peninsula). Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere. 2012, XVI (2): 9–22. [In Russian].