

Палеогляциология

УДК 551.345:544.02

doi: 10.31857/S2076673420020038

Реконструкция зимней температуры воздуха раннего и среднего голоцена по изотопному составу ледяных жил восточного побережья полуострова Дaurкина, Чукотка

© 2020 г. Н.А. Буданцева*, А.А. Маслаков, Ю.К. Васильчук, А.В. Баранская, Н.В. Белова, А.К. Васильчук, Ф.А. Романенко

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*nadin.budanceva@mail.ru

Winter air temperature in the early and middle Holocene on the eastern coast of Daurkin Peninsula, Chukotka, reconstructed from stable isotopes of ice wedges

N.A. Budantseva*, A.A. Maslakov, Yu.K. Vasil'chuk, A.V. Baranskaya, N.V. Belova, A.C. Vasil'chuk, F.A. Romanenko

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*nadin.budanceva@mail.ru

Received May 16, 2019 / Revised July 30, 2019 / Accepted December 13, 2019

Keywords: *Chukotka, deuterium excess, Holocene, hydrogen isotopes, ice vein/wedge, oxygen isotopes, paleotemperature reconstruction, peatland, radiocarbon age, winter air temperature.*

Summary

The object of research is the Holocene massive ice veins on the Eastern coast of the Daurkin Peninsula, the easternmost part of the Chukotka. Peat bogs with ice veins occur on the surface of marine terraces (near Uelen and Lorino settlements) and on flood plain of the Koolen' Lake; the thickness of peat varies from 0.7 to 2.5 m. Radiocarbon dating of the peat enclosing the investigated ice veins near Uelen and Lorino indicated that the beginning of peat accumulation began at the end of Late Pleistocene – early Holocene, about 11 cal ka BP. On the flood plain of the Koolen' Lake peat bogs began to accumulate in the middle Holocene, i.e. around 6 cal ka BP. At the initial stage of peat bogs formation the rate of peat accumulation was high and could reach 1 cm/10 years. Ice veins occur at a depth of 0.5–1 m, and their lower parts are located in the underlying peat sandy loams and loams. In the upper levels of the peat bogs, narrow present-day ice veins are found, which are sometimes embedded in the upper parts of Holocene veins. A clear sign of syngenetic growth of veins is the upward bending of the layers of the host peat at the lateral contacts with the veins. The main source of water for the formation of ice veins is snow, as evidenced by the ratio of stable isotopes of oxygen and hydrogen and the values of deuterium excesses in the ice. A slight admixture of saline water (probably from a seasonally thawed layer) was noted in the veins near the Lorino settlement. Reconstructions of winter air paleotemperatures, performed on the basis of data of isotope-oxygen composition of ice from the veins, did show that at the period between 11 and 6 cal Ka BP, the mean winter air temperature on the Daurkin Peninsula was by 2–5 °C lower than today, but the air temperature of the coldest month (January or February) was still lower (by 4–8 °C) than today. The noticeable trend of increase of stable isotope values in the ice veins from early Holocene to the present time is indicative of a steady positive trend of mean winter air temperatures in the Holocene.

Citation: Budantseva N.A., Maslakov A.A., Vasil'chuk Yu.K., Baranskaya A.V., Belova N.V., Vasil'chuk A.C., Romanenko F.A. Winter air temperature in the early and middle Holocene on the eastern coast of Daurkin Peninsula, Chukotka, reconstructed from stable isotopes of ice wedges. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019. 60 (2): 251–262. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420020038.

Поступила 16 мая 2019 г. / После доработки 30 июля 2019 г. / Принята к печати 13 декабря 2019 г.

Ключевые слова: *голоцен, дейтериевый эксцесс, зимняя температура воздуха, изотопы водорода, изотопы кислорода, палеотемпературные реконструкции, повторно-жильный лёд, радиоуглеродный возраст, торфяник, Чукотка.*

Реконструкции зимних палеотемператур воздуха на основе данных изотопно-кислородного состава льда жил показали, что между 11 и 6 тыс. лет назад среднезимняя температура воздуха была на 2–5 °C ниже современной, а температура воздуха самого холодного месяца (января или февраля) – на 4–8 °C ниже современной. Установлен устойчивый положительный тренд зимних температур воздуха от раннего голоцена до настоящего времени.

Введение

Радиоуглеродное датирование наиболее древних голоценовых образований и особенно процедура калибровки радиоуглеродных дат привели к пересмотру голоценовой хронологии и временных рамок голоцена. Анализ изменений физико-химических параметров льда гренландского керна NGRIP позволил установить выраженные признаки потепления климата (например, резкий сдвиг значений дейтериевого эксцесса, изменение концентрации пыли и толщины годовых слоёв) на границе позднего неоплейстоцена и голоцена. На основе подсчёта годовых слоёв керна NGRIP был определён возраст этой границы, и в 2008 г. Международной комиссией по стратиграфии (IUGS) граница между голоценом и неоплейстоценом была установлена на рубеже $11\,700 \pm 99$ калиброванных лет назад (относительно 2000 г.) [1]. В 2018 г. дополнительно к известному делению Блитта–Сернандера голоцен был разделён IUGS на три яруса: мегхалайский (начало 4200 лет назад, л.н.), северогриппианский (от 8200 до 4200 л.н.) и гренландский (от 11 700 до 8200 л.н.).

Палеоклиматические условия голоцена Берингии (территории, охватывающей северо-восточные регионы Сибири, Аляску и Северный Юкон, которые не подвергались оледенению в течение последнего ледникового максимума) – дискуссионны. Реконструкции летних температур воздуха по востоку региона (Аляска и Юкон) показывают наличие оптимума около 7–5 тыс. л.н. [2]. Один из доступных архивов зимней палеоклиматической информации – содержание стабильных изотопов в повторно-жильных льдах. Уравнение взаимосвязи температур воздуха и изотопно-кислородного состава повторно-жильных льдов, предложенное Ю.К. Васильчуком [3], позволяет с высокой степенью достоверности установить среднеголетние значения среднеянварских температур воздуха времени формирования жилы. Эта зависимость получена при сопоставлении значений $\delta^{18}\text{O}$ в ростках современных ледяных жил и среднезимней температуры воздуха [4, 5], что позволило применять данный подход для реконструкций зимних температур воздуха в позднем неоплейстоцене и голоцене в разных районах криолитозоны [6, 7].

Анализ содержания стабильных изотопов во льду жил успешно используется для реконструкций голоценовых зимних палеотемператур воздуха в разных районах Берингии. Для севера Аляски (район Барроу) показано, что похолодание на границе позднего неоплейстоцена и голоцена (10,7–10,2 тыс. л.н.) сменилось резким потеплением начала голоцена около 9,9 тыс. л.н. [8]. Сопоставление голоценовых и современных жил в районе Барроу и Прудо Бэй показало повышение значений $\delta^{18}\text{O}$ от раннего голоцена до настоящего времени, что объясняется общей тенденцией повышения зимних температур воздуха [9].

Для Чукотки сведения о зимних палеотемпературах голоцена до недавнего времени носили единичный характер из-за очень ограниченного объёма данных по содержанию стабильных изотопов в жилах, датированных голоценом [10, 11]. Одна из первых детальных изотопных диаграмм получена для района оз. Эльгыгытгын в центральной части Чукотки по системе повторно-жильных льдов, датированных концом позднего неоплейстоцена и голоценом [12]. В последние годы детальные полевые исследования на востоке Чукотки (г. Анадырь, пос. Лаврентия, с. Лорино) позволили выполнить реконструкции зимних палеотемператур воздуха для разных периодов голоцена [13, 14].

Задачи настоящей работы – исследовать содержание стабильных изотопов кислорода и водорода в голоценовых повторно-жильных льдах на крайнем северо-востоке Чукотки (п-ов Дауркина), реконструировать зимние палеотемпературы воздуха в голоцене и сопоставить с данными по соседним районам Восточной Чукотки.

Район исследований

Полуостров Дауркина расположен на северо-востоке Чукотки, на крайнем северо-востоке Евразии (рис. 1). Он омывается Чукотским морем Северного Ледовитого океана с севера и Беринговым морем Тихого океана с юга. Большая часть полуострова занята нагорьями высотой до 1000 м, низменности встречаются, как правило, вблизи крупных лагун. Климатические условия приморских равнин полуострова могут быть охарактеризованы на основе данных по метеостанции Уэлен,



Рис. 1. Расположение исследованных разрезов с повторно-жильными льдами на восточном побережье полуострова Дауркина, Чукотка.

a – расположение населённых пунктов; *б* – районы исследований повторно-жильных льдов: 1 – оз. Коолень; 2 – пос. Уэлен; 3 – с. Лорино

Fig. 1. Location of studied exposures with ice wedges on the eastern coast of Daurkin Peninsula, Chukotka.

a – location of settlements; *b* – sites of studied ice wedges: 1 – Koolen' Lake; 2 – Uelen settlement; 3 – Lorino settlement

постоянные наблюдения на которой вели с 1929 по 2016 г. (исключение составляет период с июля 1943 г. по июль 1944 г.). За период с 1929–1942 по 1944–2016 гг. среднегодовая температура воздуха составила в среднем $-7,5$ °С, средняя температура зимнего периода (ноябрь–апрель) – около $-16,5$ °С, средняя температура наиболее холодного месяца года – февраля – около -21 °С [15]. Отметим, что в период 1986–2016 гг. по сравнению с 1929–1959 гг. среднегодовая температура повысилась на $0,7$ °С – с $-7,8$ до $-6,5$ °С.

В пределах площадок CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring) в районе с. Лорино и пос. Лаврентия повышение среднегодовых температур воздуха и летних температур за период 2000–2017 гг. привело к увеличению мощности слоя сезонного протаивания со скоростью

от $0,5$ до $1,5$ см/год [16]. Многолетнемёрзлые породы имеют сплошное распространение. Несквозные талики мощностью до 30 – 40 м встречаются только в нижнем течении крупных рек и под крупными термокарстовыми озёрами. Температура мёрзлых пород составляет в среднем -4 ÷ -6 °С в долинах рек и на побережье и -10 °С в осевых частях горных хребтов. Мощность мёрзлых толщ меняется от 500 – 700 м в самых высоких частях хребтов до 200 – 300 м во внутренних долинах [17]. Повторно-жильные льды (ПЖЛ) широко распространены в отложениях голоценового возраста [6, 11].

Основные местонахождения изученных повторно-жильных льдов (ПЖЛ) на оз. Коолень. Олиготрофное оз. Коолень расположено в отрогах хр. Айнан, в 13 км от побережья Чукотского

моря, на высоте 42 м над ур. моря (все высоты в статье даны над уровнем моря). Озеро имеет тектоническое происхождение, в западной его части глубина достигает 100 м. Из него вытекает одна река — Кооленьваам, впадающая в Уэленскую лагуну [18]. Выпукло-полигональный рельеф типичен для береговой зоны оз. Коолень. На южном берегу оз. Коолень, в 1,2 км от истока р. Кооленьваам (65°59'04" с.ш., 170°58'47" з.д.), на озёрной пойме был заложен шурф глубиной 2 м. В шурфе были вскрыты: торф рыже-коричневый, слабоопесчаненный, талый (глубина 0–0,4 м); под ним залегает торф коричневый, мёрзлый, среднелдыстый, криотекстура сетчатая (0,4–0,7 м); ниже — супесь серая (0,7–2 м), криотекстура тонкошлировая. В толще залегает ПЖЛ с современным ростком. Лёд жилы — прозрачный, вертикально-полосчатый, состоит из элементарных жилок шириной 0,4–0,6 см с вертикально ориентированными пузырьками воздуха.

ПЖЛ вблизи пос. Уэлен. На южном берегу лагуны Уэлен, в 5 км к юго-западу от пос. Уэлен (66°07'36.6" с.ш., 169°52'26.0" з.д.) в естественном обнажении низкой террасы высотой около 2 м вскрыта ледяная жила шириной 1,6 м и высотой до 1,4 м (рис. 2, а). Рельеф поверхности представлен сетью выпуклых полигонов, превышение центра полигона над канавками составляет 0,2–0,7 м. Лёд жилы — мутный, пузырчатый, серый и тёмно-бурый, с чётко выраженной вертикальной полосчатостью. Вмещающие отложения представлены среднеразложившимся бурым торфом. На глубине 1,2 м торф подстилается тёмно-серым суглинком с тонкошлировой слоистой криогенной текстурой. На сингенетический характер жилы указывает загибание горизонтов торфа на боковых контактах с жилой.

ПЖЛ у с. Лорино. Вблизи с. Лорино, расположенного на берегу Мечигменского залива Берингова моря (65°30'00" с.ш., 171°43'00" з.д.), жилы вскрыты в обнажении останца морской террасы неоплейстоценового возраста. На поверхности слабо прослеживается сетка вытаивающих ПЖЛ. Терраса практически вся сложена песками различной крупности с линзами и прослоями серых суглинков. В центральной части с поверхности залегает слой торфа мощностью до 4,5 м [19]. Высота поверхности террасы 22–25 м, исследованные жилы расположены в пределах понижения террасы высотой 10 м. ПЖЛ, вскрытые в разных

фрагментах торфяника, были изучены в 2015–2017 гг. В 2017 г. в торфянике опробована жила шириной в верхней части около 1,8 м с вертикальной мощностью более 2 м (см. рис. 2, б). Лёд жилы — чистый, пузырчатый, с вертикальной полосчатостью за счёт пузырьков воздуха.

Кровля жилы залегает на глубине 1 м от поверхности и на 0,5 м ниже подошвы сезонно-талого слоя (СТС). Отложения СТС представлены торфом средней степени разложения; мёрзлые отложения над головой жилы — переслаивающимися песками и тёмно-серым торфом; вмещающие отложения от кровли жилы до глубины 80 см — тёмно-серым торфом без примесей, с явными следами загибания прослоев вблизи контакта с жилой. Нижняя часть жилы внедряется в слабелдыстые серые и чёрные суглинки плитчатой текстуры.

Методы

Полевые исследования. Для изотопных определений отобраны пробы ПЖЛ по горизонтали и вертикали с интервалом 10–15 см, а для радиуглеродных определений — образцы торфа близ подошвы и кровли торфяников. Образцы льда для изотопного анализа растапливали при комнатной температуре и переливали в пластиковые флаконы, которые дополнительно упаковывали в пленку «Parafilm M» для минимизации испарения и защиты от разлива в процессе авиатранспортировки. До измерений флаконы хранились в холодильнике при температуре 3 °С.

¹⁴C возраст и изотопные определения. Радиуглеродный анализ возраста образцов торфа выполнен в Институте истории материальной культуры РАН (образцы с индексом Ле-). Изотопные измерения проводили в лаборатории стабильных изотопов географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на масс-спектрометре Finnigan Delta-V с опцией газ-бенч. Для калибровки использованы международные стандарты (V-SMOW, GRESP, SLAP). Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ выражены относительно VSMOW в промилле, точность измерений составила $\pm 0,1 \text{ ‰}$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $0,8 \text{ ‰}$ для $\delta^2\text{H}$. Калибровка ¹⁴C датировок проведена с использованием калибровочной программы Oxcal 4.2 [20], основанной на массиве калибровочных данных IntCal13 [21].

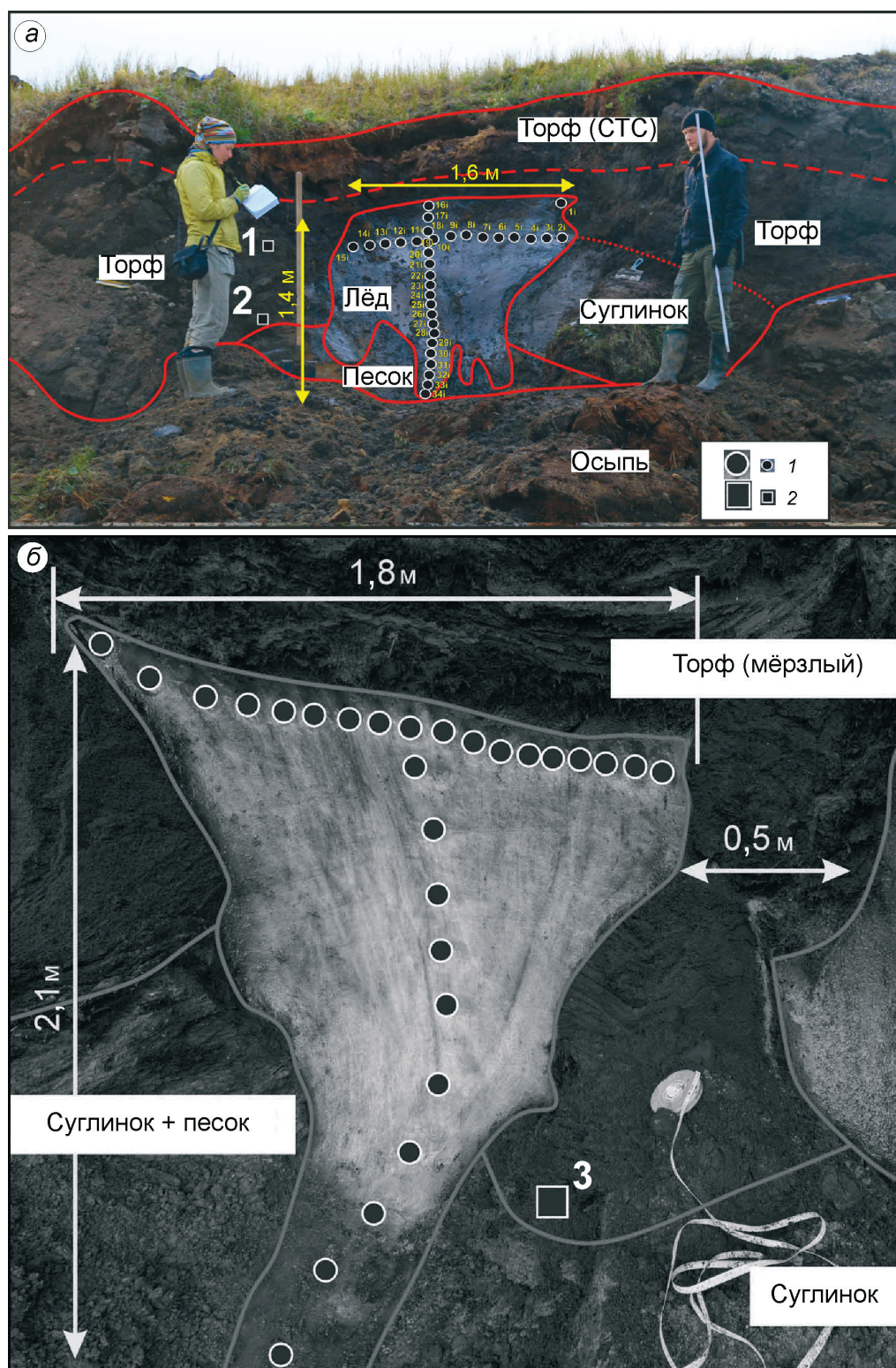


Рис. 2. Обнажение ледяной жилы в голоценовом торфянике вблизи пос. Уэлен (а) и с. Лорино (б), точки отбора льда (1) и вмещающего торфа (2).

Радиоуглеродный возраст торфа (число лет): 1 – 10 090; 2 – 10 540; 3 – 11 530

Fig. 2. Exposure of ice wedge in the Holocene peatland near Uelen settlement (a) and Lorino settlement (б), scheme of ice (1) and enclosing peat (2) sampling.

¹⁴C ages (years) of peat: 1 – 10 090; 2 – 10 540; 3 – 11 530

Результаты радиоуглеродного датирования и определения изотопного состава

ПЖЛ на оз. Коолень. Пойменные отложения оз. Коолень, близ истока р. Кооленьваам, датированы в пределах стоянки древнего человека — опорного памятника раннего этапа неолита на Чукотке [22]. В разрезе поймы в оторфованном коричневом песке на глубине 0,8 м встречен культурный слой, отмеченный большим углистым пятном и отдельными углями, а также обломанными наконечниками стрел, листовидных ножей и фрагментами керамики. Из углистого пятна получена радиоуглеродная датировка 5700 ± 300 лет (МАГ-717) [22]. Известно, что чукотские охотники и оленеводы устраивают стоянки и ставят чумы на сухих поверхностях. Мы предполагаем, что эта датировка отражает раннюю стадию субэарального развития поймы и начало формирования полигонального рельефа и роста ПЖЛ. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в жиле варьируют от $-17,9$ до $-14,9$ ‰ (рис. 3), в современном ростке получено значение $\delta^{18}\text{O}$ $-14,7$ ‰ (табл. 1).

ПЖЛ вблизи пос. Уэлен. По торфу из среднего и нижнего горизонтов торфяника, вмещающего жилу, получены ^{14}C датировки $10\,090 \pm 80$ и $10\,540 \pm 200$ лет соответственно (см. рис. 2, а, табл. 2). Вариации значений стабильных изо-

топов составили $1,6$ – $1,8$ ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и 9 – 11 ‰ для $\delta^2\text{H}$: в верхней части жилы вдоль горизонтального профиля величины $\delta^{18}\text{O}$ варьировали от $-15,9$ до $-17,8$ ‰, а $\delta^2\text{H}$ — от $-117,4$ до $-128,6$ ‰ (рис. 4, а); вдоль вертикальной оси в центре жилы значения $\delta^{18}\text{O}$ изменялись от $-16,4$ до -18 ‰, а $\delta^2\text{H}$ — от $-121,6$ до -130 ‰ (см. рис. 4, б). В самой верхней части отмечены довольно высокие значения изотопного состава ($-12,5$ и $-13,2$ ‰ по $\delta^{18}\text{O}$). Значения дейтериевого эксцесса d_{exc} во льду жилы составляли от $6,7$ до $16,8$ ‰.

ПЖЛ вблизи с. Лорино. По торфяным массивам у с. Лорино, исследованным в 2015–2017 гг., мы получили массив радиоуглеродных датировок от 8800 ± 80 до $11\,530 \pm 200$ лет [14] (см. рис. 2, б, см. табл. 2). Вариации значений стабильных изотопов в наиболее детально опробованной ледяной жиле составили 2 – $2,5$ ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и 11 – 18 ‰ для $\delta^2\text{H}$: в верхней части жилы вдоль горизонтального профиля значения $\delta^{18}\text{O}$ варьировали от $-15,5$ до -18 ‰, $\delta^2\text{H}$ — от $-117,4$ до $-135,7$ ‰ (см. рис. 4, в); вдоль вертикальной оси в центре жилы значения $\delta^{18}\text{O}$ составляли от $-16,4$ до $-18,4$ ‰, $\delta^2\text{H}$ — от $-122,4$ до $-133,6$ ‰, при этом можно отметить явное снижение значений с глубиной (см. рис. 4, г). Значения d_{exc} во льду жилы изменялись от $4,9$ до $16,8$ ‰.

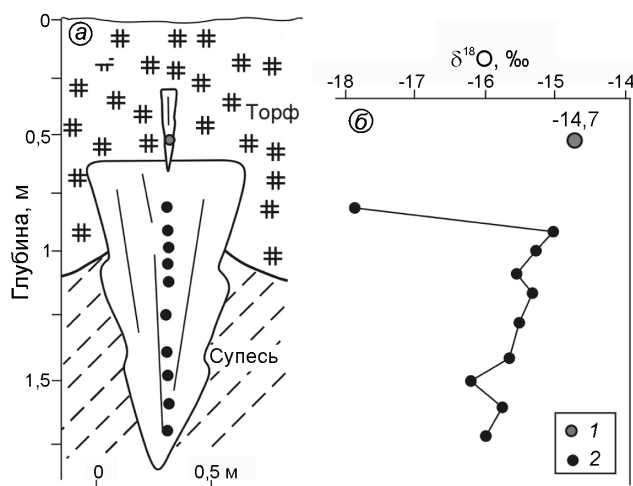


Рис. 3. Отбор образцов в ледяной жиле у оз. Коолень (а) и распределение значений $\delta^{18}\text{O}$ по глубине (б):

1 — лёд голоценовой жилы; 2 — лёд современного ростка

Fig. 3. Scheme of the ice wedge sampling at the Koolen' Lake (а) and distribution of $\delta^{18}\text{O}$ with depth (б):

1 — Holocene ice wedge; 2 — modern ice vein

Возраст повторно-жильных льдов и их изотопно-геохимическая характеристика

Калиброванный возраст торфяников (тысячи калиброванных лет назад — далее тыс. л.н.), вмещающих исследованные ледяные жилы п-ова Дауркина, варьирует от $14,1$ – $12,8$ до $7,5$ – $5,6$ тыс. л.н. Наиболее древние датировки получены для торфяных массивов в районе с. Лорино (от $8,2$ – $7,6$ до $14,1$ – $12,8$ тыс. л.н.) и пос. Уэлен (от $12,1$ – $11,2$ до $13,1$ – $11,4$ тыс. л.н.). Эти данные показывают, что формирование торфяников началось в конце дриаса и начале гренландского этапа голоцена, около 13 – 11 тыс. л.н. В районе с. Лорино и близ пос. Уэлен в процессе формирования основания торфяников, вероятно, происходили переотложение насыщенных органикой поднеоплейстоценовых отложений и привнос более древнего аллохтонного материала в формирующийся автохтонный торфяник. Этим и объясняются более древние, чем голо-

Таблица 1. Значения $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d_{exc} во льду голоценовых и современных повторно-жильных льдов (ПЖЛ) на восточном побережье п-ова Дауркина, Чукотка

Число образцов и их характеристика	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	d_{exc} , ‰
<i>Оз. Коолень</i>			
10; ПЖЛ голоценового возраста	-17,9*/-15,8/-15,0	—	—
1; современная ледяная жилка	-/-14,7/-	—	—
<i>Пос. Уэлен</i>			
33; ПЖЛ голоценового возраста	-18/-16,8/-12,5	-130/-123,2/-86	6,7/10,9/16,8
<i>Село Лорино</i>			
28; ПЖЛ голоценового возраста	-18,4/-17,1/-15,5	-135,7/-125,9/-117,4	4,9/10,6/16,8
4; современная ледяная жилка	-13,2/-13,0/-12,9	-101,2 -99,5 -97,7	1,6/4,7/6,28

*Значения: минимальные/средние/максимальные.

ценовые, датировки (14,1, 13,1, 12,8 тыс. л.н.) в нижних частях лоринского и уэленского торфяников. В районе Уэлена торф аккумулировался почти на протяжении всего голоцена, на что указывают датировки по ранее исследованному фрагменту торфяника [23], по которому получен возраст 8,7–8 тыс. л.н. (северогриппианский ярус голоцена) в основании торфяника и 2,7–1,4 тыс. л.н. (мегхалайский ярус голоцена) – по верхнему слою торфа (см. табл. 2).

В пойменных отложениях оз. Коолень торф аккумулировался в середине голоцена (т.е. в северогриппианский этап голоцена), судя по возрасту торфа 7,5–5,6 тыс. л.н. (см. табл. 2). Поскольку изученные нами ледяные жилы имеют явные признаки сингенеза, можно предположить близкий возраст жил и вмещающих их горизонтов торфа – раннеголоценовый (грнландский период голоцена) возраст в районе пос. Уэлен и с. Лорино и среднеголоценовый (северогриппианский период голоцена) – в районе оз. Коолень. Скорее всего, ледяные жилы в районе пос. Уэлен и с. Лорино стали формироваться около 11 тыс. л.н. На пойме оз. Коолень ледяные жилы начали расти около 6 тыс. л.н. и активно формировались в течение 2–3 тыс. лет. В дальнейшем, по достижении максимальных размеров, их рост замедлялся.

Значения изотопного состава льда раннеголоценовых жил у с. Лорино и пос. Уэлен очень близки и варьируют от -15,5 до -18,4 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и от -117,4 до -133,6 ‰ для $\delta^2\text{H}$ (рис. 5). Заметно более высокие значения, полученные в самой верхней части жилы у пос. Уэлен (-12,5 и -13,2 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$), объясняются, скорее всего, внедрением современных жилок. Для льда более молодой жилы в районе оз. Коолень получены значения $\delta^{18}\text{O}$ от -15 до -17,9 ‰, при этом для

Таблица 2. Радиоуглеродный возраст торфа, вмещающего ледяные жилы на восточном побережье п-ова Дауркина, Чукотка

Лабораторный номер	Глубина, м	^{14}C возраст некалиброванный, годы $\pm 1\sigma$	^{14}C возраст калиброванный, годы (диапазон)
<i>Оз. Коолень</i>			
МАГ-717*	0,8	5700 \pm 300	7494–5603
<i>Пос. Уэлен</i>			
Ле-11857	0,9	10 090 \pm 80	12 110–11 249
Ле-11858	1,4	10 540 \pm 200	13 051–11 393
ИЭМЭЖ-2066**	0,2	20 66 \pm 201	2740–1356
ИЭМЭЖ-896**	1,35	7545 \pm 117	8726–7980
<i>Село Лорино***</i>			
Ле-11260	0,9	9550 \pm 170	9318–8353
Ле-11262	1,2	11 230 \pm 100	11 339–10 891
Ле-11730	1,3	9860 \pm 140	9985–8838
Ле-11259	1,5	8800 \pm 80	8210–7615
Ле-11723	2,5	11 530 \pm 200	14 057–12 781

Данные: *из работы [22], **из работы [23], ***из работы [14].

основной части жилы эти значения варьируют в узком диапазоне – от -15 до -16,2 ‰.

Соотношение $\delta^2\text{H}$ – $\delta^{18}\text{O}$ во льду жилы у пос. Уэлен имеет наклон 7,53, что очень близко к наклону для глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ), равному 8, и отражает преимущественно атмосферное питание льда жилы (из талого снега) без явных трансформаций сигнала. Лёд жилы у с. Лорино имеет наклон линии соотношения $\delta^2\text{H}$ – $\delta^{18}\text{O}$ заметно ниже 8, что может указывать или на смешение талых снеговых вод и вод другого генезиса, или на процессы изотопной трансформации первичного изотопного сигнала снега до попадания в морозобойные трещины при формировании жилы. Сравнение изотопного состава голоценовых и современных

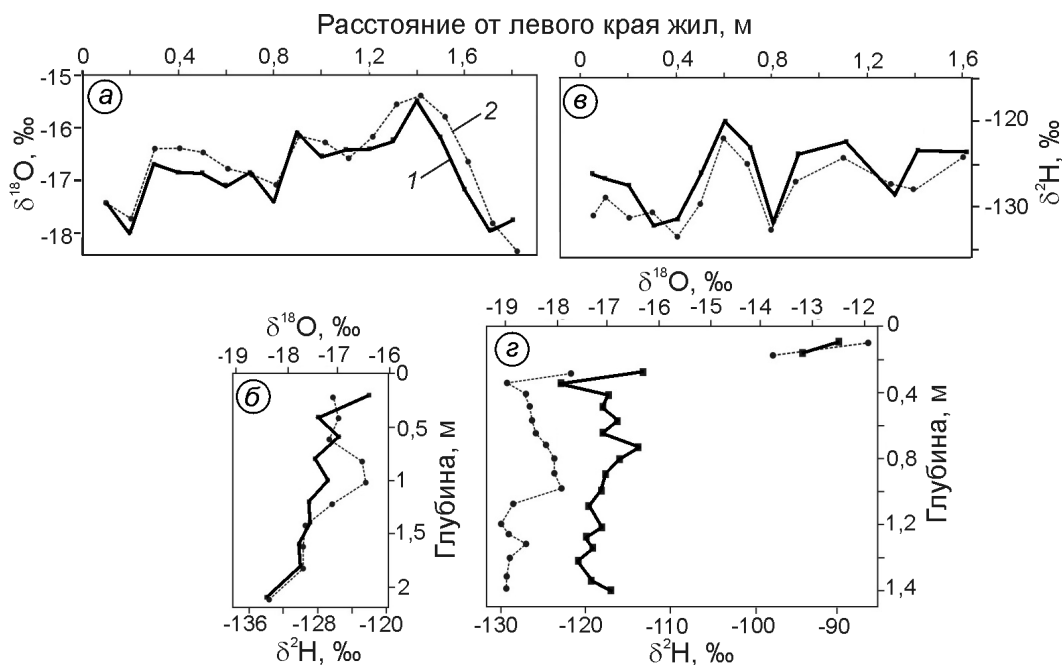


Рис. 4. Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ (1) и $\delta^2\text{H}$ (2) во льду жилы в районе пос. Уэлен (а, б) и с. Лорино (в, г) вдоль горизонтальных (а, в) и вертикальных (б, г) профилей. Расположение точек отбора образцов представлено на рис. 2
Fig. 4. $\delta^{18}\text{O}$ (1) and $\delta^2\text{H}$ (2) profiles in the ice wedge near Uelen settlement (a, б) and Lorino settlement (в, г) along horizontal (a, в) and vertical (б, г) profiles. Sampling scheme is shown on the Fig. 2

жил показывает, что последние характеризуются более высокими значениями, в среднем выше на 4 ‰ по значениям $\delta^{18}\text{O}$ и на 25 ‰ по $\delta^2\text{H}$, значения d_{exc} во льду жил варьируют от 4,9 до 16,8 ‰ (см. табл. 1), что типично для зимнего снега.

По минерализации и химическому составу лёд исследованных голоценовых жил пресный, в составе ионов преобладают хлориды, Na и Ca. Минерализация льда жилы на пойме оз. Коолень составляет 35 мг/л, по составу лёд жилы близок к воде озера [24]. Минерализация льда жил в районе с. Лорино – не более 90 мг/л, в краевых частях некоторых жил (исследованных в 2015–2016 гг.) отмечено повышенное содержание Cl (до 40 мг/л) и Na (до 20 мг/л), а иногда и нитратов (до 15 мг/л). Это может быть обусловлено затеканием в трещины засоленных вод СТС с повышенным содержанием органических веществ. Определение ионного состава жилы в районе пос. Уэлен показало, что здесь также преобладают ионы Cl и Na, в отдельных образцах отмечено повышенное содержание сульфатов. Концентрации ионов во льду жил очень невысокие – не более 16 мг/л для каждого иона.

Соотношение $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2+}$ во льду жилы на оз. Коолень составляет 1,2, что примерно соответствует этому параметру в снеге из снежника и озёрной воде. В жиле в районе Уэлена это соотношение варьирует от 1 до 6, что указывает на преимущественное формирование жил из талого снега; преобладание ионов Cl и Na связано с захватом снегом морских аэрозолей. В районе с. Лорино соотношение $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2+}$ варьирует от 1,7 до 25,6, при этом наиболее высокие значения этого параметра получены для льда с максимальной концентрацией хлоридов. Для сравнения: в морской воде значение соотношения $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2+}$ близко к 11, в криопэгах – 24–25. Во льду современного жильного ростка в районе с. Лорино это соотношение составляет 2–5,5 [24]. Поскольку жилы здесь формировались в отложениях морской террасы, возможно, что в образовании жил участвовали также засоленные воды СТС. Эти воды, как правило, представляют собой смесь зимних и летних осадков, они подвергаются испарению и неоднократному промерзанию–протаиванию, поэтому точки значений соотношения $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ расположены ниже ГЛМВ. Участием таких вод в формировании

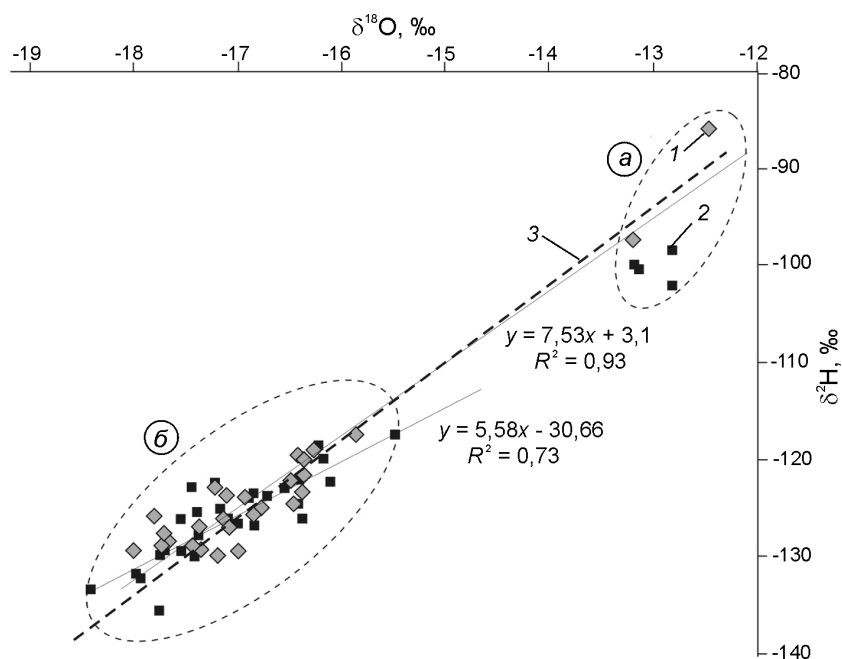


Рис. 5. Соотношение $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ в повторно-жильных льдах у с. Лорино (1) и пос. Уэлен (2):

a – значения в современных жилках; *б* – значения в голоценовых повторно-жильных льдах; 3 – глобальная линия метеорных вод

Fig. 5. $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ relation in the ice wedges near Lorino (1) and Uelen (2) settlements:

a – in the Holocene ice wedges; *б* – in the modern ice wedges; 3 – global meteoric water line

жил, вероятно, объясняется наклон линии соотношения $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ жилы, равный 5,58 (см. рис. 5).

Реконструкция зимних палеотемператур воздуха

Начало голоцена на Чукотке и сопредельных территориях характеризуется заметным повышением зимних температур воздуха относительно позднего неоплейстоцена. Это отмечается положительными пиками на изотопных диаграммах по ПЖЛ на оз. Эльгыгытгын (Центральная Чукотка) и мысе Барроу (север Аляски) [8, 12]. Поскольку большая часть жил, исследованных на Чукотке и Аляске, расположена в пределах торфяников или оторфованных с поверхности отложений, можно утверждать, что торфяники, формировавшиеся в голоцене на поверхности морских и аллювиальных террас, лайд и пойм, были участками интенсивного растрескивания и формирования ПЖЛ. Активному образованию торфяников способствовало заметное повышение летних температур воздуха. Реконструкции летних температур воздуха для Центрального Юкона (Восточная Берингия) показали существование короткого термического максимума около 10 тыс. л.н. и более продолжительного максимума между 9,6 и 6,6 тыс. л.н. (голоценовый оптимум). В эти периоды скорость аккумуляции торфа достигала 2 см/10 лет [2]. Нами по торфянику в районе г. Анадырь получена серия радио-

углеродных датировок, показывающая, что здесь в начале голоцена, между 10 и 9 тыс. л.н., скорость аккумуляции торфа была более 1 см/10 лет [13]. Подобная скорость аккумуляции отмечена и на ранней стадии формирования исследованного нами уэленского торфяника – около 0,5 м торфа накопилось примерно за 500 лет (см. табл. 2).

Содержание стабильных изотопов кислорода во льду жил, исследованных на п-ове Дауркина, варьирует от -15 до $-18,4$ ‰, более низкие значения получены для раннеголоценовых жил на побережье Берингова моря (пос. Уэлен и с. Лорино), немного более высокие (в среднем на $1-2$ ‰) – в жиле на оз. Коолень, датируемой серединой голоцена. Для севера Сибири в 1989 г. Ю.К. Васильчуком получены [3, 4] уравнения взаимосвязи среднеянварской $t_{\text{ср.янв}}$ (или среднефевральской, если февраль холоднее) и среднезимней $t_{\text{ср.зим}}$ температуры воздуха и изотопно-кислородного состава ПЖЛ:

$$t_{\text{ср.янв}} = 1,5\delta^{18}\text{O}_{\text{ПЖЛ}} (\pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}); \quad (1)$$

$$t_{\text{ср.зим}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{ПЖЛ}} (\pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}). \quad (2)$$

Современные жилки на восточном побережье п-ова Дауркина в районе исследований характеризуются значениями изотопного состава от -13 до $-14,7$ ‰, составляя в среднем $-13,3$ ‰ [4, 14]. Как уже отмечалось, в районе пос. Уэлен за период 1929–2016 гг. средняя температура воздуха зимнего периода составляла $-16,5$ °С, средняя температура воздуха наиболее холодного месяца (обычно фев-

раля, реже января) -21 °С. Применяя зависимость (1) и (2) с учётом корректировки приведённых здесь современных значений изотопного состава современных жилок и среднеянварской температуры воздуха, можно сделать вывод, что в раннем и среднем голоцене среднезимняя температура воздуха на п-ове Дауркина варьировала от -18 до $-21 \div -22$ °С, среднеянварская (среднефевральская) — примерно от -25 до $-29 \div -30$ °С. Это находится в хорошем соответствии с палеотемпературными реконструкциями по раннеголоценовым ПЖЛ в районе г. Анадырь, в которых вариации $d^{18}O$ не превышали 3 ‰ (от $-16,6$ до $-19,4$ ‰), а реконструированная средняя температура самого холодного зимнего месяца (января или февраля) составила от -25 до -29 °С [13]. Также было показано, что жилы, датированные второй половиной голоцена (в районе пос. Лаврентия, Восточная Чукотка), характеризуются более высокими значениями $d^{18}O$, чем раннеголоценовые (в среднем на $2-4$ ‰), что, скорее всего, отражает тренд повышения зимних температур воздуха [14]. Заметно более высокие значения изотопного состава современных жилок хорошо согласуются с положительным температурным трендом, отмечаемым для последних 100–150 лет в различных районах Берингии [2, 9, 13, 14].

Выводы

В пределах п-ова Дауркина на крайнем востоке Чукотки широко распространены голоценовые ледяные жилы, приуроченные к массивам торфяников. Начало их формирования

близ пос. Уэлен и с. Лорино датируется около 11 тыс. л.н. (гренландский период голоцена). На пойме оз. Коолень процесс формирования ледяных жил начался около 6 тыс. л.н. (северогриппианский период голоцена). Скорость аккумуляции торфяников на начальном этапе их формирования могла достигать 1 см/10 лет. Более низкие, чем современные, значения изотопного состава ранне- и среднеголоценовых ледяных жил позволяют сделать вывод о более суровых зимах в период между 11 и 6 тыс. л.н. по сравнению с современными. Среднезимняя температура воздуха была на $2-5$ °С ниже современной, а температура воздуха самого холодного месяца — на $4-8$ °С ниже современной. Заметный тренд повышения значений изотопного состава ледяных жил от раннеголоценовых до современных свидетельствует об устойчивом положительном тренде среднезимних температур.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-05-60272 Арктика — интерпретация результатов) и РНФ (проект № 19-17-00126 — изотопные определения). Авторы благодарны Л.В. Добрыдневой за помощь в геохимических определениях.

Acknowledgments. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant № 18-05-60272 Arctic — results interpretation) and Russian Scientific Foundation (grant № 19-17-00126 — stable isotope analysis). The authors are grateful to L.V. Dobrydneva for her participation in geochemical measurements.

Литература

1. Walker M., Johnsen S., Rasmussen S.O., Popp T., Steffensen J.-P., Gibbard P., Hoek W., Lowe J., Andrews J., Björck S., Cwynar L.C., Hughen K., Kershaw P., Kromer B., Litt T., Lowe D.J., Nakagawa T., Newnham R., Schwander J. Formal definition and dating of the GSSP (Global Stratotype Section and Point) for the base of the Holocene using the Greenland NGRIP ice core, and selected auxiliary records // *Journ. of Quaternary Science*. 2009. V. 24. P. 3–17.
2. Porter T.J., Schoenemann S.W., Davies L.J., Steig E.J., Bandara S., Froese D.G. Recent summer warming in northwestern Canada exceeds the Holocene thermal maximum // *Nature communications*. 2019.

References

1. Walker M., Johnsen S., Rasmussen S.O., Popp T., Steffensen J.-P., Gibbard P., Hoek W., Lowe J., Andrews J., Björck S., Cwynar L.C., Hughen K., Kershaw P., Kromer B., Litt T., Lowe D.J., Nakagawa T., Newnham R., Schwander J. Formal definition and dating of the GSSP (Global Stratotype Section and Point) for the base of the Holocene using the Greenland NGRIP ice core, and selected auxiliary records. *Journ. of Quaternary Science*. 2009, 24: 3–17.
2. Porter T.J., Schoenemann S.W., Davies L.J., Steig E.J., Bandara S., Froese D.G. Recent summer warming in northwestern Canada exceeds the Holocene thermal maximum. *Nature communications*. 2019, 10 (N1631). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09622-y>.

- V. 10. № 1631. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09622-y>.
3. Васильчук Ю.К. Корреляция изотопно-кислородного состава повторно-жильных льдов со среднезимними и среднеянварскими температурами воздуха // Изотопы в гидросфере. Тез. докл. 3-го Всесоюз. симпозиума. М.: Ин-т водных проблем АН СССР, 1989. С. 82–83.
 4. Vasil'chuk Y.K. Reconstruction of the palaeoclimate of the Late Pleistocene and Holocene of the basis of isotope studies of subsurface ice and waters of the permafrost zone // Water Resources. 1991. V. 17. № 6. P. 640–647.
 5. Meyer H. Late Quaternary climate history of Northern Siberia – evidence from ground ice. PhD. Potsdam: Universität Potsdam, 2003. 111 p.
 6. Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций). В 2 томах. Т. 1. М.: Изд. Отдела теоретических проблем РАН–МГУ, 1992. 420 с.
 7. Opel T., Meyer H., Wetterich S., Laepple T., Dereviagin A., Murton J. Ice wedges as archives of winter palaeoclimate: A review // Permafrost and Periglacial Processes. 2018. V. 29. № 3. P. 199–209.
 8. Meyer H., Schirrmeister L., Andreev A., Wagner D., Hubberten H.-W., Yoshikawa K., Bobrov A., Wetterich S., Opel T., Kandiano E., Brown J. Lateglacial and Holocene isotopic and environmental history of northern coastal Alaska – results from a buried ice-wedge system at Barrow // Quaternary Science Reviews. 2010. № 29. P. 3720–3735.
 9. Kanevskiy M., Shur Y., Jorgenson T., Brown D.R.N., Moskalenko N., Brown J., Walker D.A., Raynolds M.K., Buchhorn M. Degradation and stabilization of ice wedges: Implications for assessing risk of thermokarst in northern Alaska // Geomorphology. 2017. № 297. P. 20–42.
 10. Котов А.Н. Особенности криолитогеоза в зоне абляции позднеплейстоценовых ледников // История фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск: Наука, 1997. С. 249–259.
 11. Котов А.Н. Аласный и ледовый комплексы отложений северо-западной Чукотки (побережье Восточно-Сибирского моря) // Криосфера Земли. 1998. Т. 2. № 1. С. 11–18.
 12. Schwamborn G., Meyer H., Fedorov G., Schirrmeister L., Hubberten H.W. Ground ice and slope sediments archiving late Quaternary paleoenvironment and paleoclimate signals at the margins of El'gygytyn Impact Crater, NE Siberia // Quaternary Research. 2006. № 66. P. 259–272.
 13. Буданцева Н.А., Васильчук Ю.К. Реконструкция зимней температуры воздуха в голоцене по стабильным изотопам из ледяных жил в районе горо-
 3. Vasil'chuk Yu.K. Correlation of oxygen isotope composition of ice wedges and mean winter and mean January air temperature. *Isotopy v gidrosfere. Tezisy dokladov 3-go Vsesoyuznogo simpoziuma*. Isotopes in hydrosphere. Proc. of 3rd all-union symposium. Moscow: Institute of Water Problems, USSR Academy of Sciences, 1989: 82–83. [In Russian].
 4. Vasil'chuk Y.K. Reconstruction of the palaeoclimate of the Late Pleistocene and Holocene of the basis of isotope studies of subsurface ice and waters of the permafrost zone. *Water Resources*. 1991, 17 (6): 640–647.
 5. Meyer H. Late Quaternary climate history of Northern Siberia – evidence from ground ice. PhD. Potsdam: Universität Potsdam, 2003. 111 p.
 6. Vasil'chuk Yu.K. *Izotopno-kislorodny sostav podzemnykh l'dov (opyt paleogeokriologicheskikh rekonstruktsiy)*. Oxygen isotope composition of ground ice (application to paleogeocryological reconstructions). In two volumes. V. 1. Moscow: Theoretical Problems Department, Russian Academy of Sciences and Lomonosov Moscow University Publications, 1992: 420 p. [In Russian].
 7. Opel T., Meyer H., Wetterich S., Laepple T., Dereviagin A., Murton J. Ice wedges as archives of winter palaeoclimate: A review. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2018, 29 (3): 199–209.
 8. Meyer H., Schirrmeister L., Andreev A., Wagner D., Hubberten H.-W., Yoshikawa K., Bobrov A., Wetterich S., Opel T., Kandiano E., Brown J. Lateglacial and Holocene isotopic and environmental history of northern coastal Alaska – results from a buried ice-wedge system at Barrow. *Quaternary Science Reviews*. 2010, 29: 3720–3735.
 9. Kanevskiy M., Shur Y., Jorgenson T., Brown D.R.N., Moskalenko N., Brown J., Walker D.A., Raynolds M.K., Buchhorn M. Degradation and stabilization of ice wedges: Implications for assessing risk of thermokarst in northern Alaska. *Geomorphology*. 2017, 297: 20–42.
 10. Kotov A.N. The fatures of cryolithogenesis in the ablation zone of Late Pleistocene glaciers. *Istoriya fundamental'nykh issledovaniy kriosfery Zemli v Arktike I Subarktike*. The history of base research of Earth cryosphere in the Arctic and Sub-Arctic. Novosibirsk: Nauka, 1997: 249–259. [In Russian].
 11. Kotov A.N. Alas and ice-wedge ice complex of the deposits of north-western Chukotka (Eastern-Siberian sea coast). *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 1998, 2 (1): 11–18. [In Russian].
 12. Schwamborn G., Meyer H., Fedorov G., Schirrmeister L., Hubberten H.W. Ground ice and slope sediments archiving late Quaternary paleoenvironment and paleoclimate signals at the margins of El'gygytyn Impact Crater, NE Siberia. *Quaternary Research*. 2006, 66: 259–272.
 13. Budantseva N.A., Vasil'chuk Yu.K. Winter air temperature in Holocene reconstructed from the ice wedges stable water isotopes near Anadyr town. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019, 59 (1): 93–102. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-93-102. [In Russian].

- да Анадырь // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 1. С. 93–102. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-93-102.
14. *Vasil'chuk Y.K., Budantseva N.A., Farquharson L.M., Maslakov A.A., Vasil'chuk A.C., Chizhova J.N.* Isotopic evidence for Holocene January air temperature variability on the East Chukotka Peninsula // *Permafrost and Periglacial Process*. 2018. № 29. P. 283–297.
 15. Электронный ресурс: <http://meteo.ru/data/156-temperature>.
 16. *Maslakov A., Shabanova N., Zamolodchikov D., Vologubov V., Kraev G.* Permafrost Degradation within Eastern Chukotka CALM Sites in the 21st Century Based on CMIP5 Climate Models // *Geosciences*. 2019. № 9 (232). doi: 10.3390/geosciences9050232.
 17. *Колесников С.Ф., Плахт И.П.* Чукотский район // Региональная криолитология / Под ред. А.И. Попова. М.: Изд-во МГУ, 1989. С. 201–217.
 18. *Wetlands in Russia. V. 4: Wetlands in Northeastern Russia.* Compiled by A.V. Andreev. *Wetlands Intern. Russia Programme*. Moscow, 2004. 198 p.
 19. *Maslakov A., Kraev G.* Erodibility of permafrost exposures in the coasts of Eastern Chukotka // *Polar Science*. 2016. № 10. P. 374–381. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polar.2016.04.009>.
 20. *Bronk Ramsey C.* Bayesian Analysis of Radiocarbon Dates // *Radiocarbon*. 2009. V. 51. Is. 1. P. 337–360.
 21. *Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Haflidason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R.A., Turney C.S.M., van der Plicht J.* IntCal13 and marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50 000 years cal BP // *Radiocarbon*. 2013. V. 55. P. 1869–1887.
 22. Памятники, памятные места истории и культуры Северо-Востока России (Магаданская область и Чукотка) / Науч. ред. Н.Н. Диков. Магадан: Книж. изд-во, 1994. 256 с.
 23. *Киселев Н.К., Князев А.В., Савинецкий А.Б., Хасанов Б.Ф.* Уэленский среднеголоценовый торфяник на крайнем северо-востоке Чукотского полуострова // *Изв. РАН. Сер. Геогр.* 1996. № 3. С. 86–94.
 24. *Буданцева Н.А., Васильчук Дж.Ю., Маслаков А.А., Васильчук А.К., Васильчук Ю.К.* Геохимический состав голоценовых повторно-жильных льдов северо-востока Чукотки // *Арктика и Антарктика*. 2017. № 2. С. 34–53. doi: 10.7256/2453-8922.2017.2.22980.
 14. *Vasil'chuk Y.K., Budantseva N.A., Farquharson L.M., Maslakov A.A., Vasil'chuk A.C., Chizhova J.N.* Isotopic evidence for Holocene January air temperature variability on the East Chukotka Peninsula. *Permafrost and Periglacial Process*. 2018, 29: 283–297.
 15. <http://meteo.ru/data/156-temperature>.
 16. *Maslakov A., Shabanova N., Zamolodchikov D., Vologubov V., Kraev G.* Permafrost Degradation within Eastern Chukotka CALM Sites in the 21st Century Based on CMIP5 Climate Models. *Geosciences*. 2019, 9 (232). doi: 10.3390/geosciences9050232.
 17. *Kolesnikov S.F., Plakht I.R.* Chukotka Area. *Regional'naya Kriolitologiya*. Regional Cryolithology. Ed. A.I. Popov. Moscow: MSU, 1989: 201–217 [In Russian].
 18. *Wetlands in Russia. V. 4: Wetlands in Northeastern Russia.* Compiled by Andreev A.V. *Wetlands Intern. Russia Programme*. Moscow, 2001: 198 p.
 19. *Maslakov A., Kraev G.* Erodibility of permafrost exposures in the coasts of Eastern Chukotka. *Polar Science*. 2016, 10: 374–381. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polar.2016.04.009>.
 20. *Bronk Ramsey C.* Bayesian Analysis of Radiocarbon Dates. *Radiocarbon*. 2009, 51 (1): 337–360.
 21. *Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Haflidason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R.A., Turney C.S.M., van der Plicht J.* IntCal13 and marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50 000 years cal BP. *Radiocarbon*. 2013, 55: 1869–1887.
 22. *Monuments, memorials of history and culture of the North-East of Russia (Magadan region and Chukotka).* Ed. N.N. Dikov. Magadan: Magadan Publ. House, 1994: 256 p. [In Russian].
 23. *Kiselev N.K., Knyazev A.V., Savinetskiy A.B., Khasanov B.F.* Uelen middle Holocene peatland on the extreme northeast of the Chukotka Peninsula. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. News of the Academy of Sciences, Geographical Series. 1996, 3: 86–94 [In Russian].
 24. *Budantseva N.A., Vasil'chuk J.Y., Maslakov A.A., Vasil'chuk A.C., Vasil'chuk Y.K.* Geochemical composition of Holocene ice wedges of the northeast of Chukotka. *Arktika i Antarktika*. Arctic and Antarctic. 2017, 2: 34–53. doi: 10.7256/2453-8922.2017.2.22980. [In Russian].