

УДК 551.345:544.02

РЕКОНСТРУКЦИЯ СРЕДНЕЯНВАРСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В РАННЕМ ГОЛОЦЕНЕ НА ВОСТОЧНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ ЧУКОТКИ

© 2023 г. Н. А. Буданцева^{1,*}, А. А. Маслаков¹, Ю. К. Васильчук¹,
А. К. Васильчук¹, Л. П. Кузякин¹

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

**e-mail: nadin.budanceva@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.07.2022 г.

После доработки 12.11.2022 г.

Принята к публикации 06.03.2023 г.

Формирование полигонального торфяника на поверхности третьей морской террасы в районе села Лорино на восточном побережье Чукотки началось в конце позднего дриаса и завершилось в начале голоцена. Среднеянварская температура воздуха в первой половине гренландского периода голоцена, реконструированная на основе данных изотопного состава повторно-жильных льдов, возраст которых не моложе 10–9 тыс. кал. лет назад, в среднем на 3°C ниже современной и варьировала от –23 до –27°C.

Ключевые слова: повторно-жильный лёд, восточная Чукотка, торфяники, изотопы кислорода, изотопы водорода, голоцен, палеотемпературные реконструкции, радиоуглеродный возраст

DOI: 10.31857/S2076673423010039, **EDN:** НХОРЕМ

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно считается, что наиболее активное развитие торфяников в пределах криолитозоны связано со временем, называемым “голоценовый оптимум” или “термический максимум” и датированным серединой голоцена. Это представление связано с хорошо изученными полигональными торфяниками Западной Сибири, где они, чаще всего, активно росли 5–9 тыс. лет назад (Vasil’chuk, Vasil’chuk, 2016). В ряде регионов активное накопление торфяников началось раньше, то есть 9–10 тыс. лет назад, как, например, случилось с древними аласными торфяниками в низовьях р. Колымы (Vasil’chuk, Budantseva, 2022). Чукотские полигональные торфяники изучаются сравнительно недавно, но уже первые результаты показали, что они нередко начинали формироваться более 10–11 тыс. лет назад (Романенко и др., 2011; Буданцева и др., 2020). Также есть данные о том, что на арктических островах: архипелаг Хайда Гуай в Британской Колумбии, Канада (Lacourse et al., 2012) и о. Свердруп (Тарасов и др., 1995) полигональные торфяники начали формироваться в начале гренландского периода голоцена. Заметим, что это также районы, находившиеся в голоцене под влиянием морского климата.

Цель работы – определить время и особенности формирования торфяника с сингенетическими повторно-жильными льдами в районе села Лорино на восточном побережье Чукотки по ре-

зультатам радиоуглеродного датирования торфа, а также оценить зимние температурные условия в течение формирования ледяных жил на основе данных изотопно-кислородного состава льда.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Село Лорино (65°30’00” с.ш., 171°43’00” з.д.) расположено на берегу Мечигменской губы Берингова моря, считается крупнейшим национальным селом на территории Чукотского полуострова (рис. 1). По данным ближайшей метеостанции в селе Уэлен, за период наблюдений 1929–2020 гг. среднегодовая температура воздуха варьировала от –4 до –6°C. Самый холодный месяц года – январь, среднемноголетнее значение среднеянварской температуры воздуха ($T_{\text{ср.январь}}$) составляет –19.3°C, при этом $T_{\text{ср.январь}}$ изменяется более чем на 20°C – от –6.5 до –29.2°C (<http://meteo.ru/data/156-temperature>).

Исследуемый район расположен в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород, талики встречаются только под крупными реками и озёрами. Широко распространён полигональный рельеф и связанные с ним повторно-жильные льды. Голоценовые повторно-жильные льды изучались в торфяниках близ села Лорино с 2015 по 2021 г.; исследованы также жилы в торфяниках сопряжённых районов восточной Чукотки на пойме оз. Коолень, в пределах морских террас



Рис. 1. Расположение села Лорино на восточном побережье Чукотки.

Fig. 1. Location of Lorino settlement on the eastern coast of Chukotka.

в районе г. Анадырь, сёл Лаврентия и Уэлен. Молодые жилки и ростки, внедряющиеся в жилы голоценового возраста, указывают на продолжающийся современный рост жил в данном регионе (Vasil'chuk et al., 2018; Буданцева и др., 2020).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Повторно-жильные льды, вскрытые в обнажениях торфяника в районе села Лорино, детально опробованы для определения изотопного состава кислорода и водорода. При хорошем вскрытии жил лёд из них отбирался как вдоль вертикального профиля в центре жилы, так и вдоль горизонтального профиля в верхней части жилы (рис. 2). Такой подход к отбору льда из жил позволяет получить наиболее полный диапазон изотопных значений, так как только при горизонтальном отборе не учитывается лёд из нижних фрагментов жил. Всего из жил отобрано 155 образцов льда. Лёд растапливался в полиэтиленовых пакетах при температуре не выше 20°C, затем вода переливалась в пластиковые флаконы, дополнительно крышка флакона обматывалась парафином для минимизации испарения. До изотопных определений флаконы с образцами хранились в холодильнике при температуре +3°C.

Определения изотопного состава кислорода и водорода во льду жил выполнялись в лаборатории стабильных изотопов географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на масс-спектрометре Delta-V Plus с применением комплекса газ-бенч. Для калибровки измерений были использованы международные стандарты V-SMOW, GRESP и SLAP. Погрешность определений составила $\pm 1\%$ для $\delta^2\text{H}$ и $\pm 0.4\%$ для $\delta^{18}\text{O}$. Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ выражены в промилле относительно

но VSMOW. Дейтериевый эксцесс d_{exc} рассчитан по формуле В. Дансгора (Dansgaard, 1964): $d_{\text{exc}} = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$.

Для радиоуглеродного датирования отобраны образцы органики из вмещающего жилы торфа (11 образцов, см. рис. 2). Датирование образцов выполнено в Институте истории материальной культуры РАН (индекс Ле) и в ЦКП "Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии" Института географии РАН (индекс ИГАН). Калибровка датировок проведена с применением программы Oxcal 4.4 на основе базы данных IntCal20 (Bronk Ramsey, 2009; Reimer et al., 2020), даты приведены в виде тысяч калиброванных лет назад (тыс. кал. лет назад).

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Голоценовые повторно-жильные льды в районе села Лорино описаны в обнажении останца третьей морской террасы высотой 22–25 м (см. рис. 2, А). В обнажениях, исследованных в 2015–2017 гг., жилы залегали в торфянике мощностью от 2 до 4 м, подстилаемом песками различной крупности с линзами и прослоями серых суглинков и супесей с включениями гальки. Ширина жил варьировала от 1.5 до 3.5 м (при нефронтальном вскрытии), высота — от 2 до 3 м (см. рис. 2, Б: а–д). Лёд жил вертикально-слоистый, с включениями пузырьков воздуха до 10 мм в диаметре. При фронтальном вскрытии жил отмечено изгибание слоёв вмещающего торфа вверх, что свидетельствует о сингенетическом росте жилы. Также в обнажении 2017 г. прослеживалась ярусность жил (см. рис. 2, Б: д), что указывает на их формирование одновременно с накоплением торфа. Над голоценовыми жилами в ряде случаев отме-

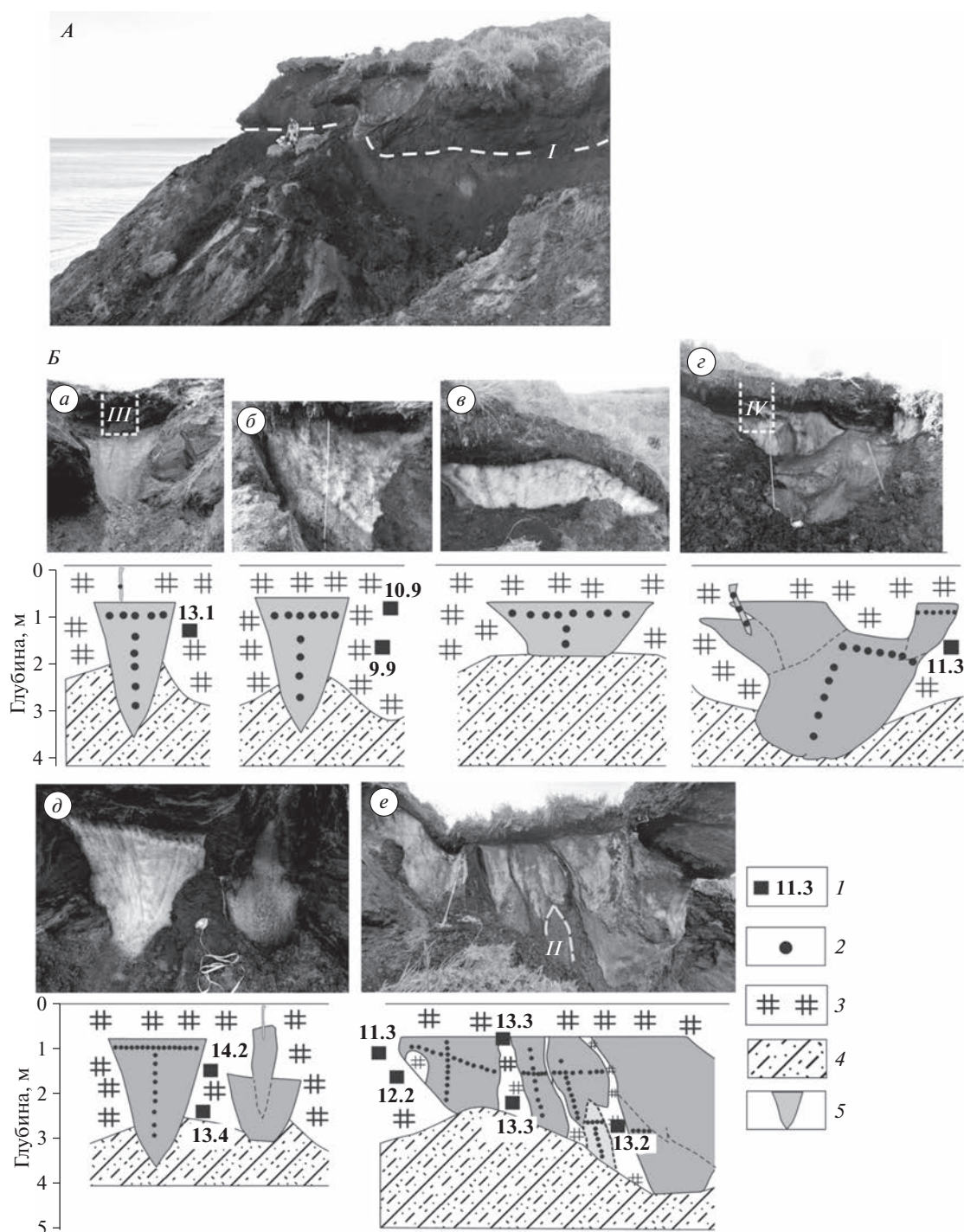


Рис. 2. Обнажение торфяника с повторно-жильными льдами в районе села Лорино (А) и фрагменты торфяника, исследованные в период с 2015 по 2021 г. (Б), ^{14}C датировки вмещающих жилы отложений (I) и схемы отбора жильного льда на изотопный анализ (2).

Фрагменты торфяника: а–в – исследованные в 2015 г. (ПЖЛ 1–3Л–15), г – исследованный в 2016 г. (ПЖЛ 4Л–16), д – исследованный в 2017 г. (ПЖЛ 5Л–17), е – исследованный в 2021 г. (ПЖЛ 6Л–21); I – нижняя граница торфяника, II – фрагмент позднеплейстоценовой жилы (ПЖЛ 7Л–21), III – современный жильный росток (ПЖЛ 8Л–15), IV – современный жильный росток (ПЖЛ 9Л–16); 3 – торф; 4 – пески с прослоями суглинков и супесей; 5 – повторно-жильные льды.

Fig. 2. Exposure of the peatland with ice wedges near Lorino settlement (A) and peatland fragments studied from 2015 to 2021 (B), ^{14}C dates of enclosing sediments (I) and schemes of sampling of ice wedges for the stable isotope analysis (2).

Peatland fragments: a–e – studied in 2015 (ПЖЛ 1–3Л–15), g – studied in 2016 (ПЖЛ 4Л–16), d – studied in 2017 (ПЖЛ 5Л–17), e – studied in 2021 (ПЖЛ 6Л–21); I – the base of the peatland, II – fragment of the Late Pleistocene ice wedge (ПЖЛ 7Л–21), III – modern ice veinlet (ПЖЛ 8Л–15), IV – modern ice veinlet (ПЖЛ 9Л–16); 3 – peat; 4 – sand with layers of loam and sandy loam; 5 – ice wedges.

Таблица 1. Радиоуглеродный возраст торфяника с ПЖЛ в районе села Лорино

Полевой номер фрагмента	Лабораторный номер образца*	Глубина отбора, м	^{14}C дата, лет назад	Среднее значение, калиброванные годы
ПЖЛ 1–3Л–15 (2015 г.)				
1Л-15	Ле – 11262	1.2	$11\,230 \pm 100$	13 140
2Л-15	Ле – 11260	0.9	9550 ± 170	10 870
	Ле – 11259	1.5	8800 ± 80	9 850
ПЖЛ 4Л–16 (2016 г.)				
4Л-16	Ле – 11730	1.3	9860 ± 140	11 340
ПЖЛ 5Л–17 (2017 г.)				
5Л-17	Ле – 11722	1.6	$12\,180 \pm 180$	14 190
	Ле – 11723	2.5	$11\,530 \pm 200$	13 410
ПЖЛ 6Л–21 (2021 г.)				
6Л-21	ИГАН – 9662	0.4	$11\,410 \pm 100$	13 290
	ИГАН – 9661	1.0	9870 ± 100	11 330
	ИГАН – 9660	1.5	$10\,320 \pm 100$	12 150
	ИГАН – 9659	2.1	$11\,450 \pm 100$	13 330
	ИГАН – 9663	2.5	$11\,250 \pm 100$	13 160

*Датировки получены в радиоуглеродных лабораториях: Ле – Институт истории материальной культуры РАН; ИГАН – ЦКП “Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии” Института географии РАН.

чены современные жильные ростки шириной до 10 см, высотой до 15 см (см. рис. 2, Б: а, г), которые формировались в течение последних 100–120 лет (Васильчук, 1992).

В 2021 г. вскрыто обнажение с ледяными жилами в приустьевой части крупного оврага. Ширина обнажения около 7.0 м, высота – 2.5 м. Скорее всего, в этом обнажении вскрыто пересечение двух жил (см. рис. 2, Б: е). Вмещающие отложения представлены торфом, с линзами серого суглинка, с сетчатой и редкошплировой криотекстурой. Жилы залегали на глубине около 0.5 м, непосредственно под сезонно-талым слоем. Лёд жил мутный, субвертикально слоистый за счёт прослоев пылеватого грунта, содержит пузырьки воздуха. Фрагменты жилы разделены субвертикальными прослоями торфа с включениями веток, корней и песка. Жилы голоценового возраста внедряются в более узкие жилы нижнего яруса, залегающие под торфяником; скорее всего, они позднеплейстоценовые.

Радиоуглеродное датирование, определение возраста отложений и повторно-жильных льдов. Все полученные радиоуглеродные датировки находятся в диапазоне от 9.85 до 14.2 тыс. кал. лет назад (табл. 1), что указывает на древний возраст торфяника и залегающих в них повторно-жильных льдов.

По фрагментам торфяника, вскрытым в 2015 г., получены датировки 9.85, 10.9 и 13.1 тыс. кал. лет. По торфу рядом с головой жилы в соседнем фрагменте торфяника, вскрытом годом позже, в 2016 г.,

получена датировка 11.3 тыс. кал. лет назад. Торф между двумя ледяными жилами во фрагменте торфяника, вскрытом в 2017 г. датирован 14.2 и 13.4 тыс. кал. лет назад, при этом более древняя датировка расположена примерно на 1 м выше более молодой. Детальнее всего датирован фрагмент обнажения торфяника, вскрытого в 2021 г. – по вмещающему ледяные жилы торфу получено 5 ^{14}C датировок от 11.3 до 13.3 тыс. кал. лет назад, при этом наиболее древние даты получены по вертикальным прослоям торфа, разделяющим фрагменты жилы (см. табл. 1).

Вариации стабильных изотопов кислорода и водорода в голоценовых и современных жилах. В каждом из изученных фрагментов торфяника для анализа стабильных изотопов опробовано от 1 до 3 ледяных жил (ПЖЛ).

Фрагмент ПЖЛ 1–3Л–15 (2015 г.). Исследованы три жилы, получены вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ (табл. 2, рис. 3): в жиле 1Л–15 – от -15.9 до -16.9‰ вдоль горизонтальной оси и от -16.3 до -18.0‰ вдоль вертикальной оси; в жиле 2Л–15 – от -14.0 до -16.6‰ по горизонтали и от -15.6 до -16.3‰ – по вертикали, в жиле 3Л–15, скорее всего, нефронтально вскрытой, отмечены незначительные вариации от -16.2 до -17‰ , что, скорее всего, указывает на то, что отобран лёд примерно одного возраста.

Фрагмент ПЖЛ 4Л–16 (2016 г.). Исследована одна жила, значения $\delta^{18}\text{O}$ варьировали от -14.2 до -17.9‰ по горизонтали и от -16.3 до -18.0‰ по

Таблица 2. Значения $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d_{exc} в голоценовых ПЖЛ, позднеледниковых и современных ледяных жилах в районе села Лорино

Полевой номер фрагмента ПЖЛ	Число проб	$\frac{\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}}{d_{\text{exc}}, \text{‰}}$		
		min	mid	max
ПЖЛ 1–3Л–15 (2015 г.)				
1Л – 15	10	–18.0	–16.7	–15.9
2Л – 15	10	–16.6	–15.5	–14.0
3Л – 15	10	–17.0	–16.4	–16.2
ПЖЛ 4Л–16 (2016 г.)				
4Л – 16	17	$\frac{-18.0/-139.9}{3.8}$	$\frac{-16.7/-125.1}{8.7}$	$\frac{-14.2/-105.4}{12.6}$
ПЖЛ 5Л–17 (2017 г.)				
5Л – 17	25	$\frac{-18.4/-135.7}{6.5}$	$\frac{-17.2/-126.4}{11.1}$	$\frac{-16.2/-118.4}{16.8}$
ПЖЛ 6Л-21(2021 г.), фрагмент голоценовой жилы				
6Л – 21	62	$\frac{-17.9/-134.7}{3.9}$	$\frac{-16.8/-125.6}{9}$	$\frac{-15.1/-106.9}{16.2}$
ПЖЛ 7Л-21 (2021 г.), фрагмент позднплейстоценовой жилы				
7Л – 21	17	$\frac{-21.0/-155.9}{4.7}$	$\frac{-19.5/-145.6}{10.7}$	$\frac{-18.1/-133}{17.9}$
Современные ледяные жилы				
8Л – 15	1	–	–16.8	–
9Л – 16	3	$\frac{-13.2/-99.8}{5.4}$	$\frac{-13.1/-99}{5.7}$	$\frac{-12.9/-97.7}{6.3}$

вертикали; значения $\delta^2\text{H}$ варьировали от –105.4 до –139.9‰ (см. табл. 2, рис. 3).

Фрагмент ПЖЛ 5Л–17 (2017 г.). Исследована одна жила, получены вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ от –15.5 до –18.0‰ вдоль горизонтального профиля и от –16.2 до –18.4‰ вдоль вертикального профиля; значения $\delta^2\text{H}$ варьировали от –118.4 до –135.7‰ (см. табл. 2, рис. 3).

Наибольший массив изотопных данных (62 определения) получен по нескольким фрагментам жил, вскрытых в 2021 г. (точка ПЖЛ 6Л–21), в которых выполнен отбор вдоль нескольких горизонтальных и вертикальных профилей. Значения $\delta^{18}\text{O}$ варьировали от –15.1 до –19.4‰ вдоль горизонтальных профилей и от –15.8 до –17.8‰ вдоль вертикальных профилей. Значения $\delta^2\text{H}$ варьировали от –106.9 до –134.7‰. В жиле, вскрытой под торфяником (ПЖЛ 7Л–21), отмечены более низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ (в среднем ниже на 2–3‰) – от –19.1 до –20.2‰ по горизонтали и от –18.1 до –21.0‰ по вертикали; значения $\delta^2\text{H}$ варьировали от –133.0 до –155.9‰ (см. табл. 2, рис. 3).

Значения дейтериевого эксцесса во льду голоценовых жил варьируют в диапазоне от 3.8 до 17.9‰, однако большая часть значений d_{exc} находится в диапазоне от 6 до 12‰.

По современным ледяным росткам получены в целом более высокие значения $\delta^{18}\text{O}$ – от –12.9 до –16.8‰. Сопоставление значений $\delta^{18}\text{O}$ по голоценовым жилам показывает, что диапазон значений в каждой из них не превышает 4‰, средние значения $\delta^{18}\text{O}$ по жилам отличаются не более чем на 2‰ (см. рис. 3, табл. 2).

Точки парных значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ по жилам расположены вблизи глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) (рис. 4, А). Наклон линии соотношения $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ во льду жил варьирует от 6.1 до 8. По двум жилам получены наклоны линий соотношения $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$, равные 7.3 (для ПЖЛ 6Л–21; см. рис. 4, В) и 8 (для ПЖЛ 4Л–16; см. рис. 4, Г), что близко к ГЛМВ и говорит о хорошей сохранности изотопного сигнала зимних осадков в жильном льду и слабом влиянии процессов изотопного фракционирования. Для жилы фрагмента 5Л–17 получен наклон линии соотношения

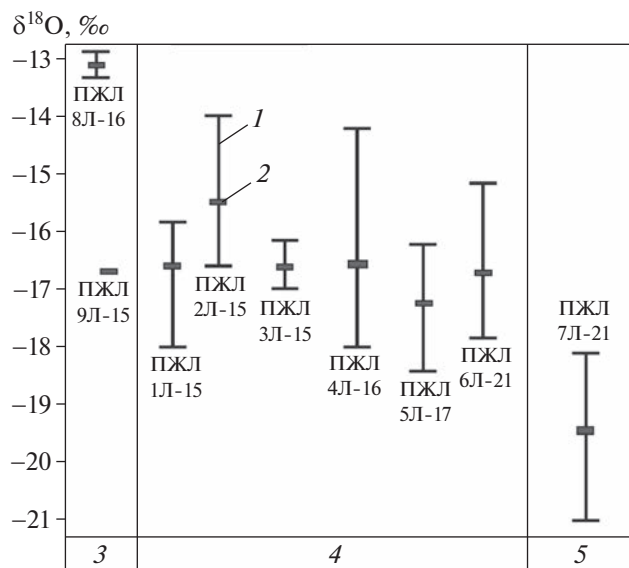


Рис. 3. Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ в ПЖЛ (1 – диапазон, 2 – среднее значение) в современных ростках (3), в ледяных жилах, датированных раннегреландским периодом голоцена от 11.7 до 9.9 тыс. лет назад (4) и в позднеплейстоценовой жилы (5).

Fig. 3. Variations of $\delta^{18}\text{O}$ values in ice wedges (1 – range, 2 – mean value) in modern ice veinlets (3), in ice wedges dated to early Greenlandian stage of the Holocene, from 11.7 to 9.9 ka BP (4) and in the Late Pleistocene ice wedges (5).

$\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$, равный 6.1 при коэффициенте линейной аппроксимации $R^2 = 0.7$ (см. рис. 4, Б). Возможно, в формировании этой жилы принимали участие воды сезонно-талого слоя, либо снег подвергался изотопному фракционированию в процессе испарения или заполнения морозобойных трещин.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Калиброванный радиоуглеродный возраст начала формирования торфяников на северо-востоке криолитозоны России. Полученный массив новых радиоуглеродных датировок по фрагментам торфяника в районе села Лорино указывает на начало накопления торфа в этом районе в конце позднего дриаса – наиболее древние датировки старше 13 тыс. кал. лет назад. Выраженной особенностью торфяника считаются инверсии ^{14}C датировок. Подобные инверсии отмечены ранее при датировании полигонального торфяника на побережье залива Онемен вблизи Анадыря, где в нижней части торфяника отмечены возрастные инверсии: над датировкой 8.9 тыс. кал. лет назад получены датировки 9.7 и 9.4 тыс. кал. лет назад (Буданцева, Васильчук, 2019). В целом переотложение органики в криолитозоне обычное явление, так как в синкриогенных толщах органика очень хорошо

сохраняется и при их размыве выносятся и переоткладывается в более молодые отложения. Поэтому в толщах с инверсиями ^{14}C датировок следует тщательно отбраковывать заведомо более древние образцы (запредельные датировки, которые обычно в полигонально-жилых комплексах получены по переотложенному материалу). Ближе всего к истинному времени седиментации и синкриогенного промерзания отложений в северных районах криолитозоны обычно будет самая молодая датировка из всей серии полученных из того или иного горизонта дат (Vasil'chuk, Vasil'chuk, 2017).

На настоящий момент отсутствуют достаточные данные, чтобы оценить меру аллохтонности изученного торфяника, поскольку следы переотложения органических остатков отсутствуют, визуально остатки растений определяются как “*in situ*”. Если допустить преимущественно автохтонный характер накопления лоринского торфяника и определить время его накопления приблизительно от 14 до 9.9 тыс. кал. лет назад, то для сравнения можно привести данные (как по сопредельным районам восточной Чукотки, так и по более отдаленным регионам) о начале накопления торфяников до официально принятого начала голоцена – 11.7 тыс. кал. лет назад – и об их активном формировании в первой половине греландского периода голоцена. По торфянику на крайнем востоке Чукотки в районе селения Уэлен получены датировки 12–13 тыс. кал. лет назад (Романенко 2011; Буданцева и др., 2020); по торфянику в районе полярной станции Валькарай, расположенной на севере Чукотки, на побережье Восточно-Сибирского моря, получены датировки 11.77 и 10.94 тыс. лет назад. Столь раннее начало накопления торфа вступает в определенное противоречие с положением о том, что начало голоцена фиксируется началом аккумуляции торфяников, на это обратил внимание М.И. Нейштадт (1983).

Начало формирования торфяников ранее 11–12 тыс. лет назад в районах с морским климатом обусловлено тем, что похолодание позднего дриаса (определяемое приблизительно от 12.6 до 13 тыс. лет назад) присуще зимним сезонам и не проявилось в летние сезоны. Уже в течение этого периода происходило развитие болот, сопровождавшееся аккумуляцией торфа, а палинологические данные указывают на появление древесной растительности (Макеев и др., 1989; Микишин и др., 2010; Lozhkin et al., 2011).

П. Андерсон и А.В. Ложкин (1996) установили отсутствие признаков похолодания позднего дриаса в палиноспектрах осадков оз. Глухое близ Магадана. Первый максимум пыльцы березы, соответствующий переходу от плейстоценовых условий к голоценовым, датирован

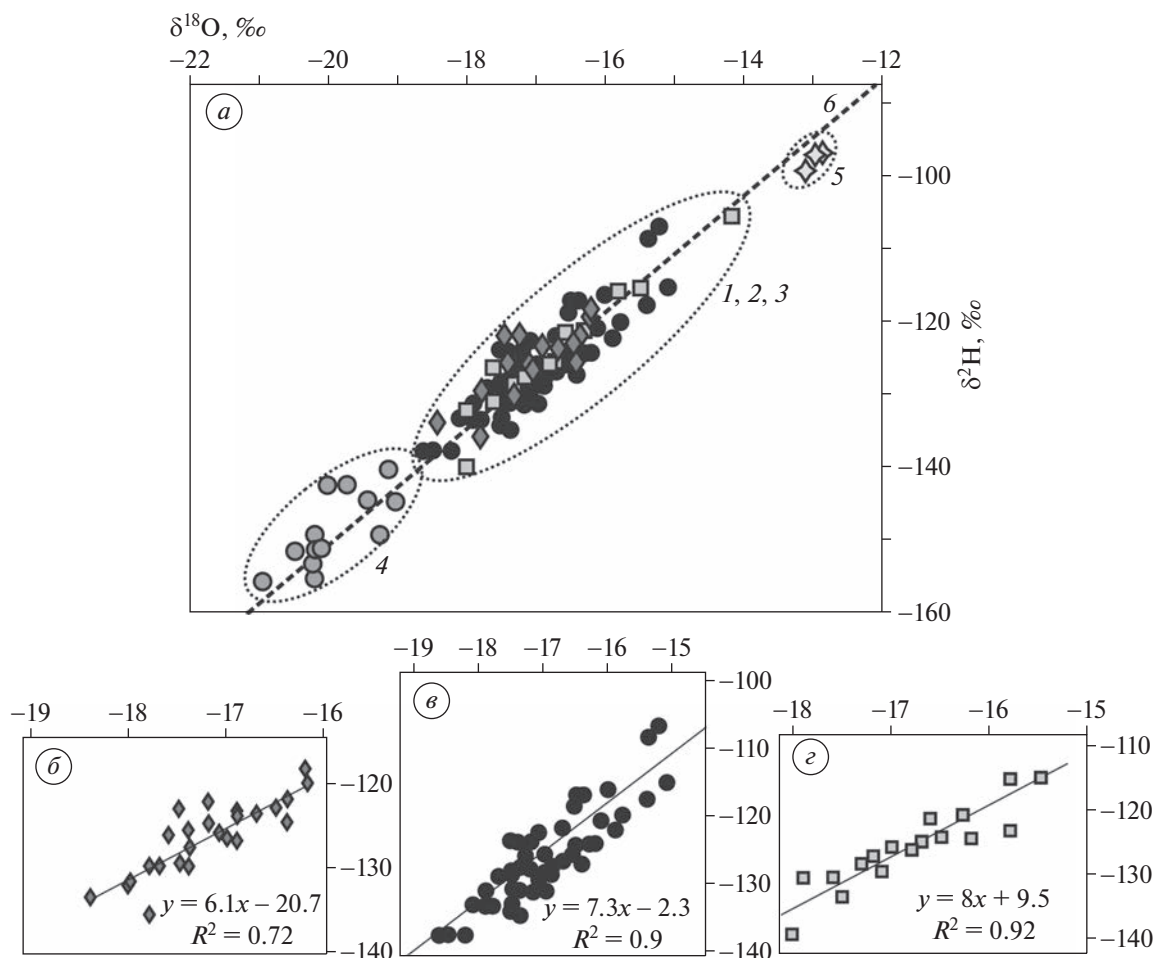


Рис. 4. А – соотношение значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в голоценовых повторно-жильных льдах обнажений 4Л–16 (1), 5Л–17 (2), 6Л–21 (3), в позднелейстоценовой ПЖЛ, фрагмент 7Л–21 (4) и современной жилке, фрагмент 9Л–16 (5) и расположение изотопных значений относительно глобальной линии метеорных вод (6); Б–Г – соотношение значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в голоценовых повторно-жильных льдах и уравнения для линий наклона $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$: ПЖЛ 5Л–17 (Б), ПЖЛ 6Л–21 (В), ПЖЛ 4Л–16 (Г).

Fig. 4. А – ratio of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values in Holocene ice wedges (IW) of peatland fragments 4Л–16 (1), 5Л–17 (2), 6Л–21 (3), in Late Pleistocene IW of the fragment 7Л–21 (4) and modern ice veinlet IW in the fragment 8Л–16 (5) and location of isotope values relative to global meteoric water line (6); Б–Г – ratio of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values in the Holocene ice wedges and equations for ratio lines $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$: IW 5Л–17 (Б), IW 6Л–21 (В), IW 4Л–16 (Г).

ими 12450 ± 50 лет (МАГ-616), то есть 14960–14300 кал. лет назад. В других районах Дальнего Востока постледниковый термический максимум прослеживается примерно между 13 и 8.7 тыс. кал. лет назад, при этом похолодание позднего дриаса, судя по палинологическим данным, на севере Дальнего Востока также не отмечено. Возраст торфяных отложений указывает на то, что на Дальнем Востоке торф начал накапливаться в раннем голоцене (Lozhkin et al., 2011). Временные границы этого теплого интервала отличаются от других районов Сибири, где термический оптимум относится к периоду 10–4 тыс. кал. лет назад (MacDonalld et al., 2000).

Отсутствие признаков похолодания в позднем дриасе подтверждается также палинологическими данными по торфяникам Сахалина. Первое раннеголоценовое потепление климата, отвечающее аллереду, согласно модифицированной шкале периодизации голоцена Блитта–Сернандера–Нильсона, на о. Сахалин (Микишин и др., 2010) датировано 14–13 тыс. кал. лет назад по радиоуглеродным датировкам торфа в основании торфяников как в центральной части о. Сахалин, так и на побережьях. В этот период на о. Сахалин распространились лиственный и лиственный-березовые леса, потеснившие кедровый стланик, ольховник и кустарниковые виды берез. Впервые в составе голоценовых палиноспектров появи-

лась пыльца ели. Одновременно с формированием торфяников в регионе формировались почвы, датированные в интервале 13–12 тыс. кал. лет назад (Микишин и др., 2010).

На о. Котельный (75°24' с.ш., 140°32' в.д.) появление пыльцы древесных пород в позднеплейстоценовых террасовых отложениях в долине р. Балыктах до 40% от общего количества фиксируется около 14420 кал. лет назад (12320 ± 30 лет) после практически полного её отсутствия (Макеев и др., 1989, с. 63). На о. Свердруп (74°30' с.ш., 79°30' в.д.) начало накопления торфяника датировано 11640 ± 40 лет (ГИН-7625) или 13500 кал. лет назад (Тарасов и др., 1995), то есть аккумуляция торфа началась в аллереде.

Поскольку древние датировки получены по торфяникам прибрежных районов и островов, можно предположить, что именно в условиях морского климата похолодание позднего дриаса не проявилось, и накопление торфа, начавшееся в аллереде, продолжилось в гренландский период голоцена. Однако зимние условия в позднем дриасе были более суровыми, чем в голоцене. На это может указывать более легкий изотопный состав сохранившегося фрагмента доголоценовой жилы в исследованном торфянике в районе села Лорино. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в этом фрагменте варьируют от -18.5 до -21.0‰ , что близко к значениям $\delta^{18}\text{O}$ (от -18.6 до -22.8‰) в позднеплейстоценовой жиле, исследованной в районе города Анадырь (Васильчук, 1992). Это может говорить о том, что зимние условия позднего дриаса близки к зимним условиям позднего плейстоцена.

Реконструкция среднеянварской температуры воздуха в районе села Лорино в раннем голоцене. Соотношение $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ во льду жил, исследованных в обнажении торфяника вблизи села Лорино, показывает хорошую сохранность изотопного сигнала зимних осадков и позволяет применять значения $\delta^{18}\text{O}$ для палеотемпературных реконструкций.

Для расчёта приблизительной среднеянварской температуры воздуха применено уравнение зависимости, предложенное Ю.К. Васильчуком (Vasil'chuk, 1991): $T_{\text{ср.январь}} = 1.5\delta^{18}\text{O}_{\text{ПЖЛ}} \pm 3^\circ\text{C}$ (1), основанное на зависимости значений $\delta^{18}\text{O}$ во льду жил от среднеянварской температуры. Для района исследований показана корректность применения данной зависимости на основе сопоставления значений $\delta^{18}\text{O}$ в современных ледяных ростках (от -12.9 до -16.8‰) и значениях $T_{\text{ср.январь}}$, фиксируемых на метеостанции селения Уэлен за последние 90 лет (от -6.5 до -29.2°C). Расчёт по уравнению (1) даёт значения $T_{\text{ср.январь}}$ от -19.4 до -25.2°C , которые находятся внутри диапазона реальных значений $T_{\text{ср.январь}}$ на метеостанции, а также позволяют говорить о том, что морозобойное рас-

трескивание и рост ледяных жил происходит в более холодные зимы.

Учитывая, что основная часть значений $\delta^{18}\text{O}$ по исследованным жилам голоценового возраста находится в диапазоне от -15.5 до -18.0‰ , расчёт по уравнению (1) показал, что среднеянварская температура воздуха в начале голоцена в районе села Лорино варьировала от -23.3 до -27°C . Более древние доголоценовые жилы (по одной из которых получены значения $\delta^{18}\text{O}$ от -18.1 до -21.0‰) формировались в условиях более суровых зим, когда среднеянварская температура воздуха изменялась от -27.2 до -31.5°C .

Возможно, в позднем плейстоцене и раннем голоцене более суровые зимние климатические условия на восточном побережье Чукотки обусловлены большей удаленностью от открытой акватории океана – источника влагонесущих масс. Косвенно на это могут указывать более высокие значения дейтериевого эксцесса во льду голоценовых жил и фрагмента позднеплейстоценовой жилы (средние значения $d_{\text{exc}} = 8.7$ – 11.1‰). В настоящее время влияние океанических воздушных масс в регионе более заметно: северный сектор Тихого океана обеспечивает от 40 до 60% осадков, выпадающих на востоке Чукотки в течение года, что объясняет и более низкие значения d_{exc} (от 4 до 6‰) в современных жилках в районе сел Лорино, Уэлен и города Анадырь (Vasil'chuk et al., 2018; Буданцева и др., 2020).

Для сравнения можно привести данные об изотопном составе голоценовых и современных жил, а также в снеге в более континентальном секторе Чукотки, в районе оз. Эльгыгытгын (Schwamborn et al., 2006). Жильный лёд здесь в целом изотопически более легкий: средние значения $\delta^{18}\text{O}$ в голоценовых жилах варьируют от -22.4 до -23.5‰ , в современном жильном ростке значение $\delta^{18}\text{O}$ составляет -20.4‰ ; в жильном льду средние значения d_{exc} изменяются от 8.2 до 9.1‰; в современном снеге оно составляет 6.3‰. Низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ и высокие $-d_{\text{exc}}$ (по сравнению с прибрежными районами Чукотки) объясняются удаленностью от океана и более низкими зимними температурами воздуха.

ВЫВОДЫ

Зафиксировано раннее начало формирования полигонального торфяника близ села Лорино – ранее 12 тыс. кал. лет назад, что превышает принятый возраст нижней границы голоцена (11.7 тыс. кал. лет назад) и относится к концу позднего дриаса. Торфяник формировался между 14 и 9.9 тыс. кал. лет. Аккумуляция торфа происходила при активном привносе древнего органического материала, поступавшего в результате размыва насыщенных органикой более древних

отложений, располагавшихся гипсометрически выше.

Повторно-жильные льды в торфянике начали появляться в конце позднего дриаса, однако наиболее интенсивно жилы формировались в первой половине гренландского периода голоцена. Изотопный состав в сохранившемся фрагменте доголоценовой жилы заметно легче, чем в голоценовых повторно-жильных льдах, значения $\delta^{18}\text{O}$ в реликтовом фрагменте варьируют от -18.5 до -21‰ .

Диапазон вариаций значений $\delta^{18}\text{O}$ во льду исследованных раннеголоценовых жил не превышает 3‰ , а средние значения — от -15.5 до -18‰ . Для современных ледяных жилок и ростков получены немного более высокие значения $\delta^{18}\text{O}$ — от -13.1 до -16.8‰ , подтверждена корреляция изотопно-кислородного состава современных жилок со среднеянварской температурой воздуха. Приблизительная оценка палеотемпературного сигнала на основе полученных данных по значениям $\delta^{18}\text{O}$ в исследованных повторно-жильных льдах дает основание полагать, что среднеянварская температура воздуха в раннегренландский период голоцена варьировала от -23 до -27°C .

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-05-00782, изотопные определения), в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды” и госбюджетной темы 1.4. “Антропогенная геохимическая трансформация компонентов ландшафтов”, № ЦИТИС 121051400083-1.

Acknowledgments. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 20-05-00782, stable isotope analysis), the Development program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of M.V. Lomonosov Moscow State University “Future Planet and Global Environmental Change” and state budget theme 1.4. “Anthropogenic geochemical transformation of the components of landscapes” (Center for Information Technologies and Systems number 121051400083-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андерсон П.М., Ложкин А.В. Изменение растительности и климата Северного Приохотья на границе плейстоцена и голоцена // Доклады Академии наук. 1996. Т. 348. № 3. С. 403–406.
- Буданцева Н.А., Васильчук Ю.К. Реконструкция зимней температуры воздуха в голоцене по стабильным изотопам из ледяных жил в районе города Анадырь // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 1. С. 93–102. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-93-102>
- Буданцева Н.А., Маслаков А.А., Васильчук Ю.К., Баранская А.В., Белова Н.Г., Васильчук А.К., Романенко Ф.А. Реконструкция зимней температуры воздуха раннего и среднего голоцена по изотопному составу ледяных жил восточного побережья полуострова Дауркина // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 2. С. 251–262. <https://doi.org/10.31857/S2076673420020038>
- Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций): в 2 т. М.: изд. Отдел теоретических проблем РАН, МГУ, ПНИИИС, 1992. Т. 1. 420 с.; Т. 2. 264 с.
- Макеев В.М., Арсланов Х.А., Барановская О.Ф., Космодамианский А.В., Пономарева Д.П., Тертычная Т.В. Стратиграфия, геохронология и палеогеография позднего плейстоцена и голоцена о-ва Котельного // Бюлл. Комиссии по изучению четвертичного периода. 1989. Вып. 58. С. 58–69.
- Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г., Петренко Т.И. Ранний голоцен Сахалина // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2010. № 12. С. 432–437.
- Нейштадт М.И. К вопросу о некоторых понятиях в разделении голоцена // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1983. № 2. С. 103–108.
- Романенко Ф.А., Николаев В.И., Архипов В.В. Изменения изотопного состава природных льдов побережья Восточно-Сибирского моря: географический аспект // Лёд и Снег. 2011. № 1. С. 93–104.
- Тарасов П.Е., Андреев А.А., Романенко Ф.А., Сулержицкий Л.Д. Палиностратиграфия верхнечетвертичных отложений острова Свердруп (Карское море) // Стратиграфия, геологическая корреляция. 1995. Т. 3. № 2. С. 98–104.
- Bronk Ramsey C. Bayesian Analysis of Radiocarbon Dates // Radiocarbon. 2009. V. 51. Is. 1. P. 337–360.
- Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. № 16. P. 436–468. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x>
- Lacourse T., Delepine J.M., Hoffman E.H., Mathewes R.W. A 14000 year vegetation history of a hypermaritime island on the outer Pacific coast of Canada based on fossil pollen, spores and conifer stomata // Quaternary Research. 2012. V. 78. P. 572–582.
- Lozhkin A.V., Anderson P.M., Vazhenina L.N. Younger Dryas and Early Holocene Peats from northern Far East Russia // Quaternary International. 2011. V. 237. Is. 1–2. P. 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.01.009>
- MacDonald G.M., Velichko A.A., Kremenetski C.V., Borisova O.K., Goleva A.A., Andreev A.A., Cwynar L.C., Riding R.T., Forman S.L., Edwards T.W.D., Aravena R., Hammarlund D., Szeicz J.M., Gattaulin V.N. Holocene Treeline History and Climate Change Across Northern Eurasia // Quaternary Research. 2000, 53 (3) 302–311. <https://doi.org/10.1006/qres.1999.2123>
- Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Butzin M., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K.A., Kromer B., Manning S.W., Muscheler R., Palmer J.G., Pearson C.,

- van der Plicht J., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Turney C.S.M., Wacker L., Adolphi F., Büntge U., Capano M., Fahrni S.M., Fogtmann-Schulz A., Friedrich R., Köhler P., Kudsk S., Miyake F., Olsen J., Reinig F., Sakamoto M., Sookdeo A., Talamo S. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP) // *Radiocarbon*. 2020, 62 (4): 725–757.
<https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Schwamborn G., Meyer H., Fedorov G., Schirrmeister L., Hubberten H. 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.
<https://doi.org/10.1016/j.yqres.2006.06.007>
- 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.
- Vasil'chuk Y.K., Budantseva N.A. Holocene ice wedges of the Kolyma Lowland and January paleotemperature reconstructions based on oxygen isotope records // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2022. V. 33. Is. 1. P. 3–17.
<https://doi.org/10.1002/ppp.2128>
- Vasil'chuk Y.K., Budantseva N.A., Farquharson L., 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 Processes*. 2018. V. 29. № 4. P. 283–297.
<https://doi.org/10.1002/ppp.1991>
- Vasil'chuk Y.K., Vasil'chuk A.C. Thick polygonal peatlands in continuous permafrost zone of West Siberia // *Earth's Cryosphere*. 2016, XX (4): 3–13.
[https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-4\(3-15\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-4(3-15))
- Vasil'chuk Y.K., Vasil'chuk A.C. Validity of radiocarbon ages of Siberian yedoma // *GeoRes. Journ.* 2017. V. 13. P. 83–95.
<https://doi.org/10.1016/j.grj.2017.02.004>
- Meteo Publications // Электронный ресурс. <http://meteo.ru/data/156-temperature> (Дата обращения: 20.09.2022).

Citation: Budantseva N.A., Maslakov A.A., Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., Kuzyakin L.P. Reconstruction of the mean January air temperature in the Early Holocene on the eastern coast of Chukotka. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (1): 93–103 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423010039

Reconstruction of the mean January Air Temperature in the Early Holocene on the Eastern Coast of Chukotka

N. A. Budantseva^{a, #}, A. A. Maslakov^a, Yu. K. Vasil'chuk^a, A. C. Vasil'chuk^a, and L. P. Kuzyakin^a

^a Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

[#] e-mail: nadin.budanceva@mail.ru

The investigation is concerned with the Early Holocene syngenetic massive wedge ice exposed in the outcrop of a polygonal peatland in the upper part of the third marine terrace near Lorino settlement on the eastern coast of Chukotka. Based on the obtained radiocarbon dates of peat, it was found that the formation of a peatland in the area began about 14–13 cal ka BP, at the end of the Younger Dryas, while the termination of the active stage of peat accumulation was dated to about 10–9 cal ka BP. The beginning of peat accumulation at the end of the Younger Dryas, earlier the officially accepted limit of the lower boundary of the Holocene (11.7 cal ka BP), and the termination of its formation by the middle of the Greenlandian Holocene period is not a rare phenomenon in Russian permafrost zone, although it is traditionally assumed that the most active formation of peatlands has been going on during the thermal maximum in the middle of the Holocene. The age inversions noted in the peat vertical profiles are the most likely indicative of the processes of re-deposition of ancient organic material due to erosion by water of the third marine terrace sediments and the separation of the allochthonous peat. During the period from 2015 to 2021, six fragments of peatland exposures with the ice wedges were studied. Analysis of the obtained data on the content of stable oxygen isotopes in the ice show that $\delta^{18}\text{O}$ values vary within the range from -15.5 to -18‰ . These values are in good agreement with the data for Early Holocene ice wedges earlier obtained in other areas of the eastern coast of Chukotka (Anadyr town, Uelen settlement), where authors report the $\delta^{18}\text{O}$ values from -16 to -19.4‰ . This suggests that the ice wedge growth as well as the peat accumulation were the most active in Early Holocene. The highest $\delta^{18}\text{O}$ values (from -13.1 to -16.8‰) were obtained for the modern ice veinlets. The ratio $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ in the ice wedges, in general, is indicative of a good preservation of isotope signature of winter precipitation. It has been found that approximate mean January air temperature in the Early Greenlandian period varied from -23 to -27°C , which is, on average, 3°C below than the present-day ones.

Keywords: ice wedges, eastern Chukotka, peatlands, oxygen isotopes, hydrogen isotopes, Holocene, paleotemperature reconstructions, radiocarbon age

REFERENCES

- Anderson P.M., Lozhkin A.V. Changes in the vegetation and climate of the Northern Okhotsk region at the boundary of the Pleistocene and Holocene. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. Reports of the USSR Academy of Sciences. 1996, 348 (3): 403–406 [In Russian].
- Budantseva N.A., Vasil'chuk Y.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 [In Russian].
<https://doi.org/10.15356/20766734-2019-1-93-102>
- Budantseva N.A., Maslakov A.A., Vasil'chuk Yu.K., Baranskaya A.V., Belova N.G., 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. 2020, 60 (2): 251–262 [In Russian].
<https://doi.org/10.31857/S2076673420020038>
- Vasil'chuk Y.K. Oxygen isotope composition of ground ice (application to paleogeocryological reconstructions). Moscow: Theoretical Problems Department Academy of Sciences and Lomonosov Moscow University Publications. 1992, 1: 420, 2: 264 [In Russian].
- Makeev V.M., Arslanov H.A., Baranovskaya O.F., Kosmodamianskij A.V., Ponomareva D.P., Tertychnaya T.V. Stratigraphy, geochronology and paleogeography of the Late Pleistocene and Holocene of Koteln'y Island. *Byulleten' Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*. Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period. 1989, 58: 58–69 [In Russian].
- Mikishin Y.A., Gvozdeva I.G., Petrenko T.I. Early Holocene of Sakhalin. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. Actual problems of humanities and natural sciences. 2010, 12: 432–437 [In Russian].
- Neishtadt M.I. On the question of some concepts for the Holocene division. *Izvestiya Ros. Akad. Nauk. Seriya geograficheskaya*. Proc. of Russian Academy of Sciences. Geographical series. 1983, 2: 103–108 [In Russian].
- Romanenko F.A., Nikolaev V.I., Arkhipov V.V. Changes in the isotopic composition of natural ice on the East Siberian Sea coast: a geographical aspect. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2011, 1: 93–104 [In Russian].
- Tarasov P.E., Andreev A.A., Romanenko F.A., Sulerzhitsky L.D. Palinostratigraphy of upper quaternary deposits of Sverdrup Island (Kara Sea). *Stratigrafiya, geologicheskaya korrelyatsiya*. Stratigraphy, geological correlation. 1995, 3 (2): 98–104 [In Russian].
- Bronk Ramsey C. Bayesian Analysis of Radiocarbon Dates. *Radiocarbon*. 2009, 51 (1): 337–360.
- Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*. 1964, 16: 436–468. doi: 10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x.
- Lacourse T., Delepine J.M., Hoffman E.H., Mathewes R.W. A 14 000 year vegetation history of a hypermaritime island on the outer Pacific coast of Canada based on fossil pollen, spores and conifer stomata. *Quaternary Research*. 2012, 78: 572–582.
- Lozhkin A.V., Anderson P.M., Vazhenina L.N. Younger Dryas and Early Holocene Peats from northern Far East Russia. *Quaternary International*. 2011, 237 (1–2): 54–64. 1
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.01.009>.
- MacDonald G.M., Velichko A.A., Kremenetski C.V., Borisova O.K., Goleva A.A., Andreev A.A., Cwynar L.C., Riding R.T., Forman S.L., Edwards T.W.D., Aravena R., Hammarlund D., Szeicz J.M., Gattaulin V.N. Holocene Treeline History and Climate Change Across Northern Eurasia. *Quaternary Research*. 2000, 53 (3) 302–311.
<https://doi.org/10.1006/qres.1999.2123>.
- Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Butzin M., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K.A., Kromer B., Manning S.W., Muscheler R., Palmer J.G., Pearson C., van der Plicht J., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Turney C.S.M., Wacker L., Adolphi F., Büntge U., Capano M., Fahrni S.M., Fogtmann-Schulz A., Friedrich R., Köhler P., Kudsk S., Miyake F., Olsen J., Reinig F., Sakamoto M., Sookdeo A., Talamo S. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*. 2020, 62 (4): 725–757.
<https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>.
- Schwamborn G., Meyer H., Fedorov G., Schirrmeister L., Hubberten H. 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.
<https://doi.org/10.1016/j.yqres.2006.06.007>.
- 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.
- Vasil'chuk Y.K., Budantseva N.A. Holocene ice wedges of the Kolyma Lowland and January paleotemperature reconstructions based on oxygen isotope records // Permafrost and Periglacial Processes. 2022, 33 (1): 3–17.
<https://doi.org/10.1002/ppp.2128>.
- Vasil'chuk Y.K., Budantseva N.A., Farquharson L., 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 Processes*. 2018, 29 (4): 283–297.
<https://doi.org/10.1002/ppp.1991>.
- Vasil'chuk Y.K., Vasil'chuk A.C. Thick polygonal peatlands in continuous permafrost zone of West Siberia. *Earth's Cryosphere*. 2016, XX (4): 3–13.
[https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-4\(3-15\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-4(3-15)).
- Vasil'chuk Y.K., Vasil'chuk A.C. Validity of radiocarbon ages of Siberian yedoma. *GeoRes. Journal*. 2017, 13: 83–95.
<https://doi.org/10.1016/j.grj.2017.02.004>.
- Meteo Publications. Электронный ресурс. <http://meteo.ru/data/156-temperature> (Last access: 20 September 2022).