

ИЗОСКЕЙПЫ И ПАЛЕОИЗОТЕРМЫ СРЕДНЕЯНВАРСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ГОЛОЦЕНЕ НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (ПО ДАННЫМ ИЗОТОПНО-КИСЛОРОДНОГО СОСТАВА ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ)

Н.А. Буданцева¹, Ю.К. Васильчук², А.К. Васильчук³

¹⁻³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

¹ Кафедра геохимии ландшафтов и географии почв,
ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: nadin.budanceva@mail.ru

² Кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, проф., д-р геол.-минерал. наук; e-mail: vasilch_geo@mail.ru

³ Лаборатория геоэкологии Севера, вед. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: alla-vasilch@yandex.ru

Проведено исследование голоценовых массивов с повторно-жильными льдами в пределах 16 участков на севере Западной Сибири, проанализирован возраст повторно-жильных льдов, обобщены данные по содержанию стабильных изотопов ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) во льду жил. Соотношение $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ и значения d_{exc} во льду исследованных жил указывает на хорошую сохранность изотопного сигнала зимних осадков во льду, что позволяет применять значения $\delta^{18}\text{O}$ для палеотемпературных реконструкций. Установлено в целом субмеридиональное положение изоскейп (линий равных значений $\delta^{18}\text{O}$), построенных по голоценовым и современным жилам, показано снижение значений $\delta^{18}\text{O}$ в жилах с запада на восток исследуемой территории. С учетом новой схемы деления голоцена показано, что в течение гринландского и первой половины северогриппианского периодов голоцена (11,4–6 тыс. кал. лет назад) среднеянварская температура воздуха ($T_{\text{ср. янв}}$) на севере Западной Сибири варьировала в интервале от -21 до -30°C , с конца северогриппианского – в течение мегхалайского периодов голоцена (5,2–0,9 тыс. кал. лет назад) $T_{\text{ср. янв}}$ варьировала от -24 до -27°C . Установлено близкое к современному субмеридиональное положение голоценовых среднеянварских палеоизотерм и снижение значений $T_{\text{ср. янв}}$ с запада на восток. Показано, что в целом на севере Западной Сибири в голоцене преобладали стабильные зимние климатические условия, при этом среднеянварская температура воздуха была в среднем на $1-2^\circ\text{C}$ ниже современной.

Ключевые слова: повторно-жильный лед, изотопы кислорода, изотопы водорода, радиоуглеродный возраст

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.7

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на относительно небольшую продолжительность голоцена – 11,7 тыс. лет – это время отмечено значительными изменениями природной среды. В 2018 г. международной комиссией по стратиграфии принято решение о делении голоцена на 3 периода – гринландский, северогриппианский и мегхалайский. Нижняя граница гринландского периода (11,7 тыс. кал. лет назад) датирует начало голоценового потепления климата, начало северогриппианского периода (8,2 тыс. кал. лет назад) соответствует переходу к кратковременному похолоданию, нижняя граница мегхалайского периода (4,2 тыс. кал. лет назад) маркирует переход к засушливым и прохладным условиям [Walker et al., 2019].

В пределах континентальной части арктической криолитозоны сингенетические повторно-жильные льды на сегодняшний день являются единственным надежным источником зимней палеотемпературной информации. Повторно-жильные льды формируются преимущественно из снега, заполняющего морозобойные трещины в виде талой снеговой воды.

В атмосферных осадках, особенно в высокоширотных регионах, соотношения стабильных изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) являются надежными индикаторами температуры воздуха в период выпадения осадков [Vasil'chuk, 1991; Butzin et al., 2014; Meyer et al., 2015; Opel et al., 2018].

Соотношение $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ и значения дейтериевого эксцесса (d_{exc}) в жильном льду рассматриваются как показатели степени изменения первичного изотопного сигнала снега (как основного источника воды для формирования жил), в процессе испарения, сублимации или смешения с водами другого происхождения.

Цель исследования – обобщение всех имеющихся данных по изотопному составу голоценовых датированных повторно-жильных льдов на севере Западной Сибири, оценка возможного изменения первичного изотопного сигнала снега на основе анализа имеющихся парных данных $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, а также рассчитанных значений d_{exc} . Также целью работы является построение карт изоскейп по средним значениям $\delta^{18}\text{O}$ в голоценовых повторно-

жильных льдах и современных жильных ростках и построение карт палеоизотерм среднеянварских температур воздуха для выделенных периодов голоцена.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые исследования на севере Западной Сибири проводились авторами с 1996 по 2016 г., также привлечены данные, ранее полученные Ю.К. Ва-

сильчуком. В процессе полевых работ изучены обнажения с повторно-жильными льдами (рис. 1, А), выполнен отбор жильного льда для анализа стабильных изотопов и вмещающих жилы отложений для радиоуглеродного датирования. В результате собран массив данных по восьми голоценовым полигонально-жильным структурам (ПЖЛ-1–ПЖЛ-8, см. рис. 1, Б).

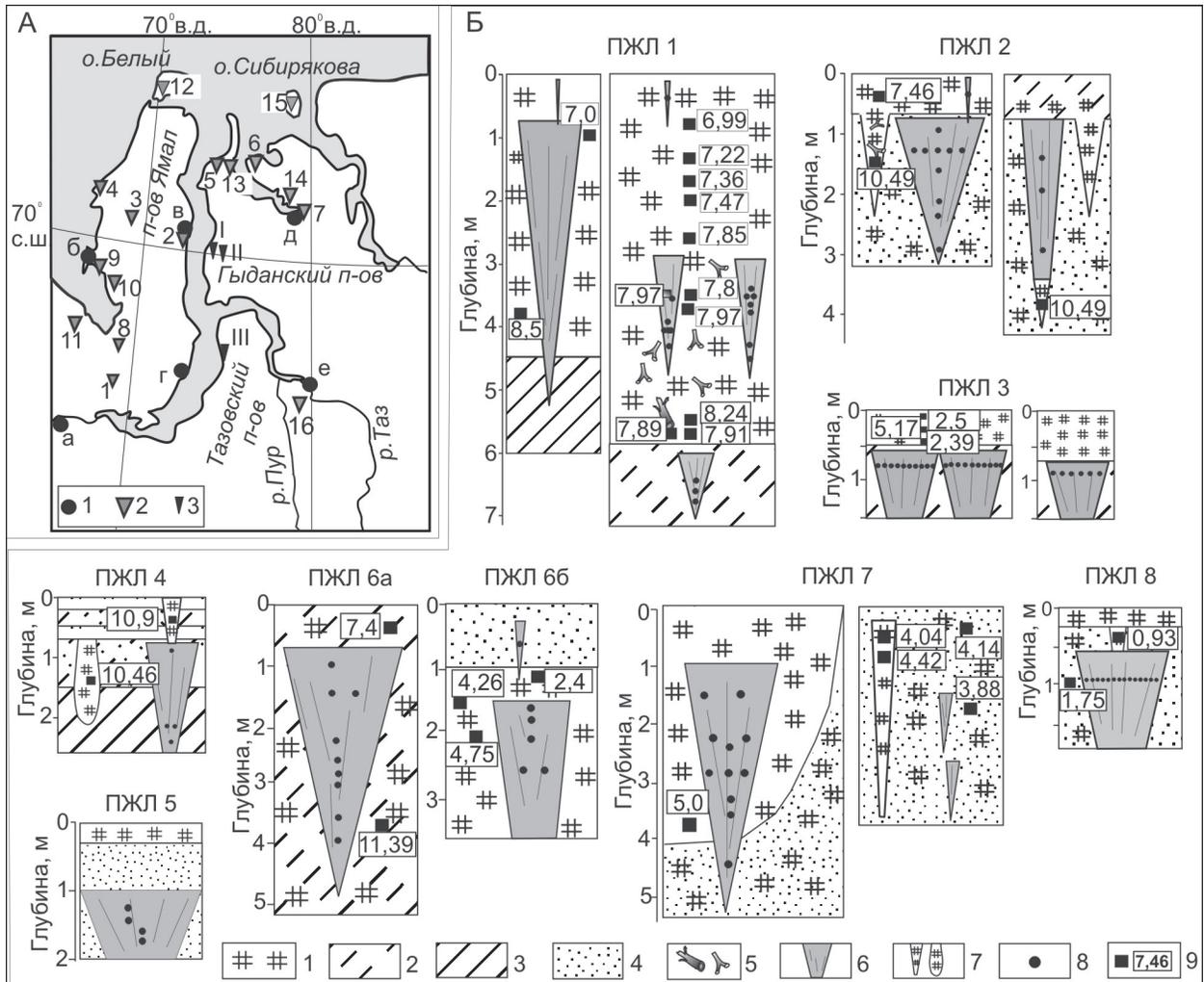


Рис. 1. Район исследования и условия отбора проб на изотопный состав льда:

А – расположение района исследований на севере Западной Сибири: 1 – метеостанции (а – г. Салехард; б – ст. Марре-Сале; в – пос. Сеяха; г – пос. Новый Порт; д – пос. Гыда; е – пос. Тазовский); 2 – участки с повторно-жильными льдами (ПЖЛ) 1–16 (голоценовые жилы и современные жильные ростки); 3 – участки с современными жильными ростками (I – пос. Напалково, II – р. Нгапкай-Яха, III – г. Ямбург); Б – стратиграфия, ¹⁴C датировки отложений с повторно-жильными льдами (ПЖЛ) исследованных авторами участков ПЖЛ 1 – ПЖЛ 8 и схемы отбора жильного льда на изотопный анализ: 1 – торф; 2 – супесь; 3 – суглинок; 4 – песок; 5 – древесные остатки; 6 – повторно-жильные льды; 7 – торфяные жилы; 8 – точки отбора льда для изотопного анализа; 9 – радиоуглеродные датировки (тыс. лет назад)

Fig. 1. Study area and conditions of sampling for the ice isotope composition:

А – Location of the study area in the Northwestern Siberia; 1 – weather stations (a – Salekhard; б – Marre-Sale; в – Seyakha; г – Novy Port; д – Gyda; е – Tazovsky); 2 – sites of studied ice wedges (IW) 1–16 (Holocene ice wedges and modern ice veinlets); 3 – sites with modern ice veinlets (I – Napalkovo settlement; II – Ngapkaï-Yakha River valley; III – Yamburg town); Б – Stratigraphy, ¹⁴C dates of enclosing sediments at the ice wedge (IW) sites IW 1–IW 8 in the Northwestern Siberia and schemes of ice sampling for stable isotope analysis: 1 – peat; 2 – sandy loam; 3 – loam; 4 – sand; 5 – wood remains; 6 – ice wedges; 7 – peat wedges; 8 – sampling of ice for stable isotope analysis; 9 – ¹⁴C dates, cal ka BP

Определения изотопного состава кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) во льду жил, исследованных до 2010 г. (ПЖЛ 1, 2, 4–8), выполнены в лаборатории изотопной гидрологии Института водных проблем РАН, в лаборатории изотопной геологии Института геологии (г. Таллин, Эстония) и изотопной лаборатории университета г. Хельсинки (Финляндия). Определения изотопного состава кислорода и водорода ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) выполнены в Центре изотопных исследований г. Гронингена (Нидерланды) и в изотопной лаборатории г. Ганновера (Германия). Определения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ во льду жил участка ПЖЛ 3 были выполнены авторами в лаборатории стабильных изотопов географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Для калибровки измерений использовались международные стандарты V-SMOW, GRESP, SLAP. Погрешность определений составила $\pm 1\%$ для $\delta^2\text{H}$ и $\pm 0,4\%$ для $\delta^{18}\text{O}$. Дейтериевый эксцесс d_{exc} рассчитан по формуле В. Дансгора [Dansgaard, 1964]: $d_{\text{exc}} = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$.

Радиоуглеродное датирование образцов органики из вмещающих жилы отложений выполнено в Институте истории материальной культуры РАН, Геологическом институте РАН и радиоуглеродной лаборатории университета г. Хельсинки, Финляндия.

Также были проанализированы данные о возрасте и изотопном составе голоценовых повторно-жильных льдов, полученные коллегами по другим участкам (ПЖЛ 9–ПЖЛ 16). Калибровка всех приведенных в статье датировок проведена с применением программы Oxcal 4.2 на основе базы данных IntCal20 [Bronk Ramsey, 2009; Reimer et al., 2020], даты приведены в виде тысяч калиброванных лет (тыс. кал. лет) назад.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Радиоуглеродное датирование и определение возраста отложений и повторно-жильных льдов. Радиоуглеродное датирование вмещающих жилы отложений, а также AMS ^{14}C датирование органики из жилы (участка ПЖЛ 1) позволило установить время формирования повторно-жильных льдов (см. рис. 1, Б).

По торфу, вмещающему жилы на участке ПЖЛ 1 (южный Ямал, долина р. Щучья), получены 13 ^{14}C датировок от 8,5 до 7 тыс. кал. лет, что позволяет говорить о формировании торфяника в конце гренландского – начале северогриппианского периода голоцена. ^{14}C AMS датировка фрагмента мха из жилы (7,97 тыс. кал. лет) очень близка к датировкам по вмещающему торфу на этой же глубине (7,8 и 7,97 тыс. кал. лет), что является надежным признаком сингенетического роста жилы.

На участке ПЖЛ 2 (восточное побережье Ямала, район пос. Сеяха), по торфу над головной жилы получена ^{14}C датировка 7,5 тыс. кал. лет, а по нижним фрагментам торфяных жил получены две одинаковые даты 10,5 тыс. кал. лет. Это позволяет говорить о формировании ледяных и торфяных жил в течение второй половины гренландского – начале северогриппианского периодов голоцена.

По торфу, перекрывающему жилу на участке ПЖЛ 3 (центральный Ямал, район пос. Бованенково), получены ^{14}C датировки от 5,17 до 2,39 тыс. кал. лет, что указывает на формирование жил во второй половине голоцена, с конца северогриппианского до середины мегхалайского периодов голоцена.

На участке ПЖЛ 4 (западное побережье п-ова Ямал, район пос. Харасавэй) по торфу над ледяной жилой получена ^{14}C датировка 10,9 тыс. кал. лет, по торфяной жиле получена датировка 10,46 тыс. кал. лет. Следовательно, около 10,5 тыс. кал. лет назад, в течение первой половины гренландского периода голоцена происходил рост повторно-жильных льдов в сформировавшейся к тому времени первой морской террасе.

Возраст жилы на участке ПЖЛ 5 (север Гыданского п-ова, устье р. Нгарка-Тетнедаяха) оценивается нами как относительно молодой, не более 3–4 тыс. лет назад (мегхалайский период голоцена), на что косвенно указывает хорошо выраженная вертикально-слоистая текстура жильного льда, которая в более древних жилах слабо выражена из-за процессов метаморфизма льда.

Для участка ПЖЛ 6а (север Гыданского п-ова, устье р. Салемлекабтамба, вторая морская терраса) наиболее достоверная датировка получена по торфу из норки грызуна – 11,4 тыс. кал. лет. Завершение активной стадии формирования массива можно отнести к 7,4 тыс. кал. лет назад, судя по датировке торфа с глубины 0,2 м, т. е. жила формировалась в течение гренландского – начале северогриппианского периодов голоцена.

На участке ПЖЛ 7 (север Гыданского п-ова, район пос. Гыда) из нижней части торфяной линзы получена ^{14}C датировка 5 тыс. кал. лет. По торфяной жиле получены ^{14}C датировки 4,04 и 4,42 тыс. кал. лет, по включениям торфа над узкими ледяными жилами получены датировки 3,88 и 4,14 тыс. кал. лет.

Отложения на исследованных участках лайды и поймы датированы преимущественно мегхалайским периодом голоцена. На участке ПЖЛ 6б (север Гыданского п-ова, лайда Карского моря) по торфу получены три ^{14}C датировки от 4,75 до 2,4 тыс. кал. лет, соответственно, жила формировалась с конца северогриппианского – в первой половине мегхалайского периодов голоцена. На участке ПЖЛ 8 (южный Ямал, пойма р. Еркутаяха) установлен

молодой возраст пойменных отложений: возраст торфа из грунтовой жилы с глубины 0,3 м составил 0,93 тыс. кал. лет, а скопления корешков на глубине 1,0 м датированы в 1,75 тыс. кал. лет.

В районе ст. Марре-Сале (участок ПЖЛ 9) ^{14}C возраст автохтонных растительных остатков из вмещающих отложений жилы варьировал от 8,8 до 6 тыс. кал. лет назад (от 7,91 до 5,2 тыс. лет назад) [Слагода и др., 2012]. На основании этих датировок период формирования жил можно определить от 8,8 до 6 тыс. кал. лет назад, т. е. концом гренландского – первой половины северогриппианского периодов голоцена.

Южнее, в районе метеостанции Виктория, исследованы жилы в линзе торфа (участок ПЖЛ 10), по которому получены датировки от 9,6 до 6,4 тыс. кал. лет. На западном берегу Байдарацкой губы, в низовьях р. Оюяхи по торфянику с жилами (участок ПЖЛ 11) получены ^{14}C датировки от 9,1 до 8,4 тыс. кал. лет [Романенко и др., 2001]. Судя по датировкам, жилы формировались с конца гренландского – в течение первой половины северогриппианского периодов голоцена (ПЖЛ 10) и в течение гренландского периода голоцена (ПЖЛ 11).

В береговых обнажениях о. Белый исследована серия ледяных жил (участок ПЖЛ 12), возраст которых можно определить от 9,5 до 8,9 тыс. кал. лет назад (гренландский период голоцена), судя по датировкам линз и включений торфа из вмещающих отложений [Баранская и др., 2018].

В устье р. Еры-Маретаяха, север Гыданского п-ова, вскрыты сингенетические ледяные жилы, залегающие под слоем торфа (участок ПЖЛ 13). По вмещающим жилы отложениям получены ^{14}C датировки 10 и 9,3 тыс. кал. лет [Облогов, 2016], что позволяет определить возраст жил гренландским периодом голоцена. На северном побережье Гыданской губы, в районе мыса Паха-Сале (участок ПЖЛ 14), в верхней части разреза по древесным остаткам из вмещающих жилы отложений получены ^{14}C датировки 8,9 и 6,1 тыс. кал. лет [Облогов, 2016], определяющие время формирования жил с конца гренландского до первой половины северогриппианского периодов голоцена.

В береговом обнажении о. Сибирякова (участок ПЖЛ 15) торф, перекрывающий ледяные жилы, датирован в 10–9 тыс. кал. лет [Облогов, 2016; Опокина и др., 2010; Стрелецкая и др., 2012], что указывает на формирование жил в течение гренландского периода голоцена. Торфяник с повторно-жильными льдами на Пуртазовском междуречье (участок ПЖЛ 16) дати-

рован от 9,4 до 6,2 тыс. кал. лет [Tikhonravova et al., 2022], возраст жил можно определить концом гренландского – первой половиной северогриппианского периода голоцена.

Анализ радиоуглеродных датировок по участкам ПЖЛ 1–ПЖЛ 16 показывает, что жилы можно отнести к трем возрастным диапазонам: наиболее древние жилы формировались преимущественно в течение гренландского периода голоцена, их возраст от 10,9 до 8,4 тыс. кал. лет назад, большая часть исследованных жил формировалась в течение гренландского – первой половины северогриппианского периодов голоцена – возраст этих жил между 11,4 и 6 тыс. кал. лет назад и наиболее молодые жилы формировались с конца северогриппианского – в течение мегхалайского периодов голоцена, от 5,2 до 0,9 тыс. кал. лет назад.

Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ в голоценовых и современных повторно-жильных льдах. Авторами обобщены данные по значениям $\delta^{18}\text{O}$ повторно-жильных льдов на всех участках (табл. 1), так как эти данные являются основной для палеотемпературных расчетов и построения карт изоскейп и палеоизотерм.

Анализ массива данных по значениям $\delta^{18}\text{O}$ участков ПЖЛ 1–ПЖЛ 16 показывает, что в жилах голоценового возраста значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют в диапазоне от $-14,1$ до $-21,9\%$ (средние значения – от -15 до $-21,4\%$), при этом более высокие значения, как правило, получены по жилам, расположенным на западных участках территории, а более низкие – по жилам в восточных и северо-восточных районах. В современных жильных ростках на севере Западной Сибири значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют от $-16,1$ до $-19,5\%$.

Зимние палеотемпературные реконструкции: основные подходы и результаты. Для расчета среднеянварских голоценовых палеотемператур воздуха было применено уравнение, полученное Ю.К. Васильчуком [Vasil'chuk, 1991] на основе анализа данных по большей части российской криолитозоны, от северо-востока Европейской части России до востока Чукотки:

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

где $T_{\text{ср. янв}}$ – среднеянварская температура воздуха, $\delta^{18}\text{O}_{\text{ж.р}}$ – изотопно-кислородный состав льда современного жильного ростка. Следует отметить, что эта зависимость позволяет получить лишь приближительные значения палеотемпературы, а допустимая погрешность $\pm 3^\circ\text{C}$ учитывает естественную изменчивость среднеянварской температуры воздуха [Васильчук и др., 2021].

Значения $\delta^{18}\text{O}$ в голоценовых повторно-жильных льдах (ПЖЛ) и современных жилках на севере Западной Сибири

Номер участка ПЖЛ (см. рис. 1, А)	Число проб	Минимальные	Средние	Максимальные
<i>Голоценовые ПЖЛ</i>				
ПЖЛ 3	28	–18,1	–17,0	–16,2
ПЖЛ 8	14	–20,6	–19,6	–18,3
ПЖЛ 9 ^а	10	–18,2	–15,8	–13,1
ПЖЛ 12 ^б	10	–19	–17,7	–16,9
ПЖЛ 13 ^в	3	–19,3	–18,6	–18,1
ПЖЛ 14 ^в	2	–19,2	–19,2	–19,1
ПЖЛ 15 ^г	6	–20,1	–19,2	–18,7
ПЖЛ 1	16	–20,3	–19,0	–17,4
ПЖЛ 2	13	–20,3	–19,6	–17,9
ПЖЛ 4	4	–15,9	–15,0	–14,1
ПЖЛ 5	4	–16,8	–17,5	–17,8
ПЖЛ 6а	9	–20,1	–18,5	–17,2
ПЖЛ 6б	5	–19,9	–19,5	–18,8
ПЖЛ 7	11	–19,9	–18,8	–16,9
ПЖЛ 10 ^д	2	–16,9	–16,8	–16,7
ПЖЛ 11 ^д	3	–17,6	–17	–16,1
ПЖЛ 16 ^е	5	–21,9	–21,4	–20,7
<i>Современные ледяные жилки</i>				
ПЖЛ 1	1	–	–18,2	–
ПЖЛ 8	1	–	–16,1	–
ПЖЛ 16 ^е	2	–19,4	–18,9	–18,4
ПЖЛ 2	3	–18,7	–17,9	–16,6
ПЖЛ 6	1	–	–19,5	–
р. Нгапкай-Яха	1	–	–18,5	–
пос. Напалково		–	–18,0	–
г. Ямбург	1	–	–18,0	–

Примечание. Изотопные данные взяты из работ: ^а [Облогов, 2016; Слагода и др., 2012], ^б [Баранская и др., 2018], ^в [Облогов, 2016], ^г [Облогов, 2016; Стрелецкая и др., 2012], ^д [Романенко и др., 2001], ^е [Tikhonravova et al., 2022].

Уравнение (1) было уточнено для региона севера Западной Сибири с учетом вариаций зимних температур воздуха, отмеченных за период регулярных метеонаблюдений (с 1930 по 2000 г.). Период 1930–1960 гг. был охарактеризован как относительно теплый в течение первой декады (1930–1940-е) с тенденцией к понижению температуры к 1960-м гг.; в конце 1960-х гг. отмечен тренд повышения температуры воздуха, которое было особенно заметным в 1990-е гг. [Васильчук, Суркова, 2020]. Для верификации уравнения были использованы средние значения $\delta^{18}\text{O}$ в современных ледяных жилках ($\delta^{18}\text{O}_{\text{ж.п}}$) в шести точках и среднеянварские температуры воздуха ($T_{\text{ср. янв}}$) за 1930–1966 и 1967–2000 гг.

по ближайшим к этим точкам метеостанциям. Установлено, что коэффициент k в зависимости $T_{\text{ср. янв}} = k\delta^{18}\text{O}_{\text{ж.п}}$ варьирует от 1,28 до 1, для 1930–1966 гг. (рис. 2, А) и от 1,33 до 1,56 – для 1967–2000 гг. (см. рис. 2, Б). Среднее значение коэффициента k в зависимости $T_{\text{ср. янв}} = k\delta^{18}\text{O}_{\text{ж.п}}$ за период метеонаблюдений и отбора образцов льда из жильных ростков составляет 1,4 (см. рис. 2, В). С учетом среднего значения коэффициента k для палеотемпературных реконструкций для региона севера Западной Сибири было использовано уравнение

$$T_{\text{ср. янв}} = 1,4\delta^{18}\text{O}_{\text{ж.п}} (\pm 3^\circ\text{C}). \quad (2)$$

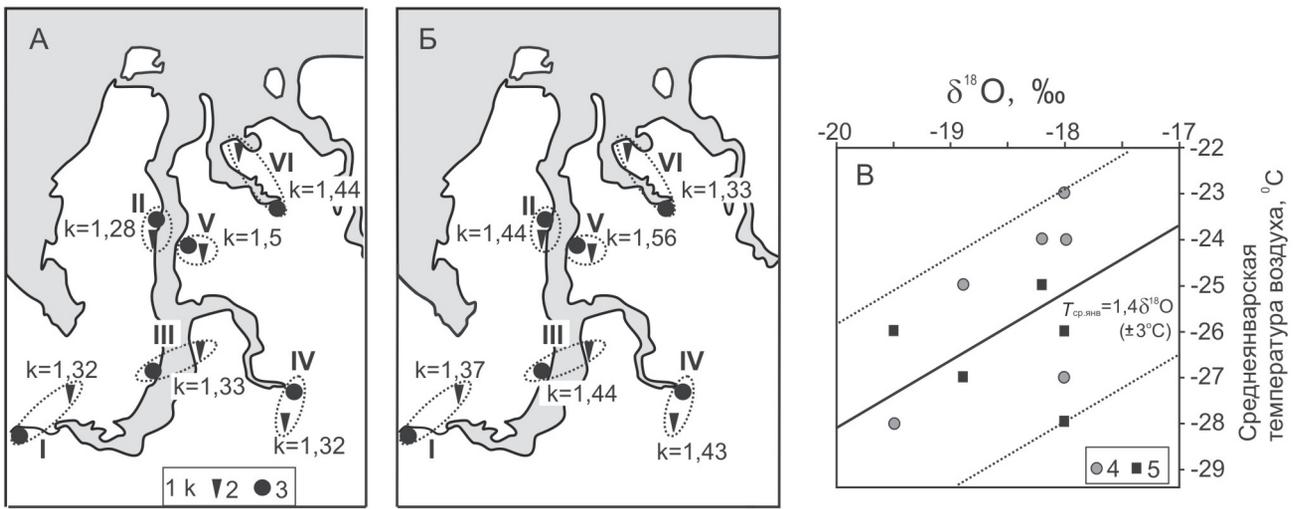


Рис. 2. Расчетные коэффициенты зависимости $T_{\text{ср. янв}} = k\delta^{18}\text{O}_{\text{ж.р}}$ для 1930–1966 гг. (А) и 1967–2000 гг. (Б): 1 – коэффициенты k ; 2 – современные жилые ростки; 3 – метеостанции (I – г. Салехард (ПЖЛ 1); II – м/с Сеяха (ПЖЛ 2), III – г. Ямбург – м/с Новый Порт; V – пос. Напалково – м/с аэропорт Напалково, VI – м/с пос. Гыда (ПЖЛ 6)); В – диаграмма соотношения $T_{\text{ср. янв}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ж.р}}$ для 1930–1966 гг. (4) и 1967–2000 гг. (5)

Fig. 2. Ratio coefficients for the equation $T_{mJ} = k\delta^{18}\text{O}_{\text{ice veinlets}}$ for the periods of 1930–1966 (A) and 1967–2000 (B): 1 – coefficients k ; 2 – modern ice veinlets; 3 – weather stations (w/s) (I – IW 1 – w/s Salekhard town; II – IW 2 – w/s Seyakha settlement; III – Yamburg town – w/s Novy Port; V – Napalkovo settlement – w/s airport Napalkovo; VI – IW 6 – w/s Gyda settlement); B – diagram of the $T_{mJ} - \delta^{18}\text{O}_{\text{ice veinlets}}$ ratio for the 1930–1966 (4) and 1967–2000 (5)

Соотношение $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ во льду исследованных жил описывается уравнением $y = 7,62x + 3,4$ ($R^2 = 0,95$), что близко к локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ), представляющей осадки, выпадающие преимущественно в виде снега в Салехарде и на Тазовском п-ове ($\delta^2\text{H} = 7,14\delta^{18}\text{O} - 14,7$) и к глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) (рис. 3). Для голоценовых ледяных жил значения d_{exc} (от 4,8 до 15‰) в

основном находятся в диапазоне значений d_{exc} для снега в Салехарде (от 2 до 9‰) и снежного покрова на Тазовском п-ове (от 9,5 до 19,5‰ [Васильчук и др., 2016]) и близки к значениям d_{exc} в современных жилых ростках (3,7–14,5‰). Это позволяет предположить, что ледяные жилы формировались из зимних осадков, изотопный состав которых почти не изменен процессами сублимации и/или испарения.

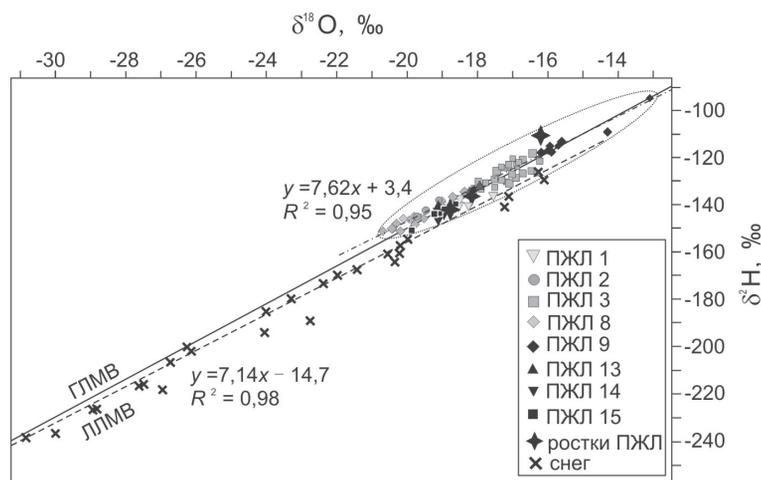


Рис. 3. Соотношение $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ в голоценовых и современных ледяных жилах, а также в современных зимних осадках (снеге) на севере Западной Сибири: ГЛМВ – глобальная линия метеорных вод, ЛЛМВ – локальная линия метеорных вод

Fig. 3. $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ ratio in Holocene and modern ice wedges, and in modern winter precipitation (snow) in the Northwestern Siberia. ГЛМВ – global meteoric water line, ЛЛМВ – local meteoric water line

Реконструкции среднеянварских температур воздуха для трех периодов голоцена. Средние значения $\delta^{18}\text{O}$ по ледяным жилам и уравнение (2) были использованы для расчетов приблизительных среднеянварских температур воздуха на севере Западной Сибири для выделенных периодов голоцена (табл. 2). Средние значения $\delta^{18}\text{O}$ по современным жильным росткам и голоценовым

жилам севера Западной Сибири стали основой для построения карт изоскейп (линий равных значений $\delta^{18}\text{O}$) для современных жил (рис. 4, А) и жил, формировавшихся в течение трех выделенных периодов голоцена (см. рис. 4, Б–Г). Отмечается в целом субмеридиональное положение изоскейп и снижение значений $\delta^{18}\text{O}$ в жилах с запада на восток.

Таблица 2

Период формирования голоценовых повторно-жильных льдов (ПЖЛ) на севере Западной Сибири, средние значения $\delta^{18}\text{O}$ в ПЖЛ и реконструированная среднеянварская температура воздуха $T_{\text{ср. янв}}$ для трех периодов голоцена

Участок с ПЖЛ (см. рис. 1, А)	^{14}C возраст вмещающих отложений, тыс. кал. лет назад	Среднее значение $\delta^{18}\text{O}$, ‰	Реконструированная $T_{\text{ср. янв}}$, °C ($\pm 3^\circ\text{C}$)*
Гренландский период (10,9–8,4 тыс. кал. лет назад)			
ПЖЛ 4	10,9–10,5	–15,0	–21,0
ПЖЛ 13	10,3–9,5	–18,6	–26,0
ПЖЛ 15	10–9	–19,2	–26,9
ПЖЛ 11	9,1–8,4	–18,1	–25,3
ПЖЛ 12	9,5–8,9	–17,7	–24,8
Гренландский – первая половина северогриппианского периодов (11,4–6 тыс. кал. лет назад)			
ПЖЛ 2	10,5–7,5	–19,6	–27,4
ПЖЛ 1	8,5–7	–19,1	–26,7
ПЖЛ 6а	11,4–7,4	–18,5	–25,9
ПЖЛ 14	8,9–6,1	–19,2	–26,9
ПЖЛ 9	8,8–6	–15,7	–22,0
ПЖЛ 10	9,6–6,4	–16,8	–23,5
ПЖЛ 16	9,4–6,2	–21,4	–30,0
Конец северогриппианского – мегхалайский периоды (5,2–0,9 тыс. кал. лет назад)			
ПЖЛ 3	5,2–2,4	–17,0	–23,8
ПЖЛ 6б	4,75–2,4	–19,5	–27,3
ПЖЛ 7	5–4	–18,8	–26,3
ПЖЛ 8	1,75–0,9	–19,6	–27,4
ПЖЛ 5	Точно не установлен	–17,5	–24,5

Примечание. *Рассчитана по уравнению (2).

Для реконструкции $T_{\text{ср. янв}}$ для гренландского периода голоцена использованы изотопные данные по жилам, датированным от 10,9 до 8,4 тыс. кал. лет. Реконструированные среднеянварские температуры варьировали от –21 до –26,9°C. Для реконструкции $T_{\text{ср. янв}}$ для гренландского – первой половины северогриппианского периодов голоцена использованы изотопные данные по жилам, датированным 11,4–6 тыс. кал. лет. Реконструированные среднеянварские температуры варьировали от –22 до –30°C. Для реконструкции $T_{\text{ср. янв}}$ для конца северогриппианского – мегхалайского периода голоцена были использованы изотопные

данные по жилам, датированным от 5,2 до 0,9 тыс. кал. лет. Реконструированные среднеянварские температуры варьировали от –23,8 до –27,4°C.

По реконструированным значениям $T_{\text{ср. янв}}$ построены карты приблизительных среднеянварских изотерм для ключевых периодов голоцена (рис. 5, Б–Г), для сравнения приведена карта современных среднеянварских изотерм (см. рис. 5, А). Можно отметить субмеридиональный характер палеоизотерм и тенденцию снижения значений $T_{\text{ср. янв}}$ с запада на восток исследуемой территории, что характерно и для современного этапа.

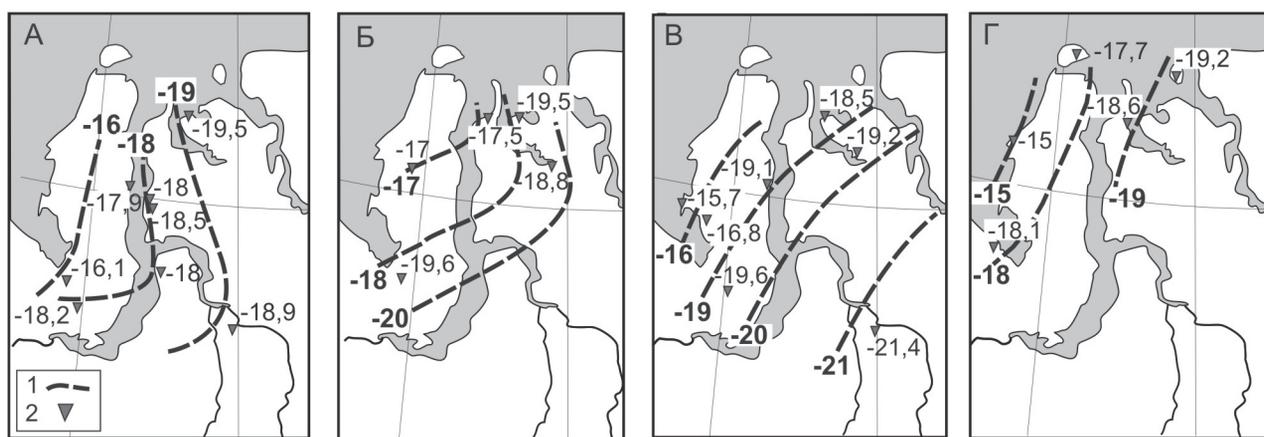


Рис. 4. Приблизительное положение изоскейп по средним значениям $\delta^{18}\text{O}$:

А – в современных ледяных жилках севере Западной Сибири; Б – в жилах, датированных концом северогриппианского – мегхалайским периодами голоцена (5,2–0,9 тыс. кал. лет назад); В – в жилах, датированных гренландским – первой половиной северогриппианского периода голоцена (11,4–6 тыс. кал. лет назад); Г – в жилах, датированных гренландским периодом голоцена (10,9–8,4 тыс. кал. лет назад); 1 – изоскейпы; 2 – участок ПЖЛ

Fig. 4. Approximate isoscapes for mean $\delta^{18}\text{O}$ values:

А – in modern ice veinlets in the Northwestern Siberia; Б – in ice wedges dated to the end of Northgrippian – Meghalayan stages of the Holocene, 5,2–0,9 cal ka BP; В – in ice wedges dated to Greenlandian – first half of Northgrippian stages of the Holocene, 11,4–6 cal ka BP; Г – in ice wedges dated to Greenlandian stage of the Holocene, 10,9–8,4 cal ka BP; 1 – isoscapes; 2 – ice wedge site

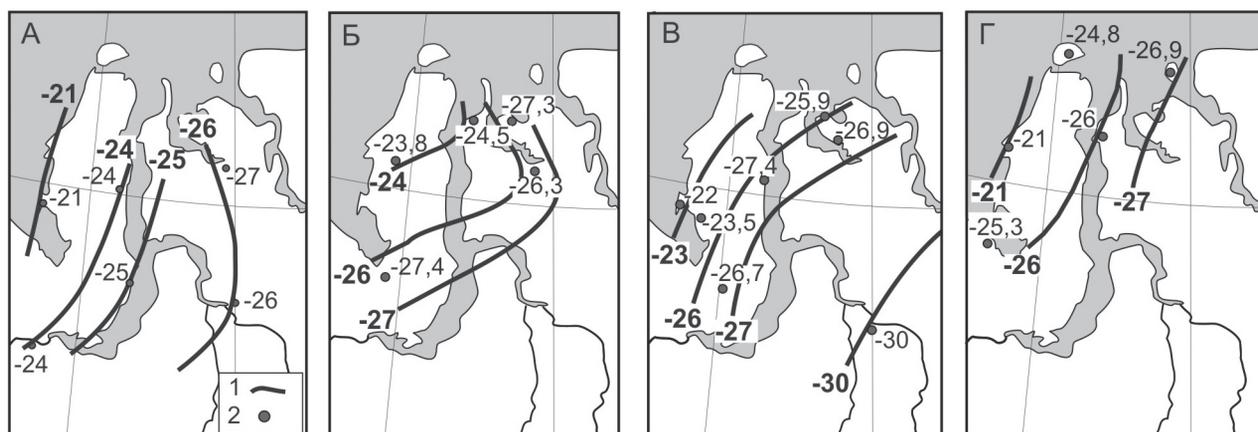


Рис. 5. Приблизительное положение изотерм средних значений среднеянварских температур воздуха севера Западной Сибири:

А – современных; Б – реконструированных для конца северогриппианского – мегхалайского периодов голоцена (5,2–0,9 тыс. кал. лет назад); В – для гренландского – первой половины северогриппианского периодов голоцена (11,4–6 тыс. кал. лет назад); Г – для гренландского периода голоцена (10,9–8,4 тыс. кал. лет назад); 1 – изотермы; 2 – среднеянварские температуры воздуха

Fig. 5. Approximate isotherms of mean January air temperature (T_{mj}) in the Northwestern Siberia:

А – modern; Б – reconstructed for the end of Northgrippian – Meghalayan stages of the Holocene, 5,2–0,9 cal ka BP; В – for Greenlandian – first half of Northgrippian stages of the Holocene, 11,4–6 cal ka BP; Г – for Greenlandian stage of the Holocene, 10,9–8,4 cal ka BP; 1 – isotherms; 2 – T_{mj}

Сопоставление карт палеоизотерм показало, что среднеянварские температуры на севере Западной Сибири в течение гренландского – первой половины северогриппианского периодов голоцена – интервала, который считается термическим оптимумом, так и в течение мегхалайского периода ухудшения климатических условий, были довольно близкими.

Сопоставление полученных палеоклиматических трендов для севера Западной Сибири с другими районами Арктики показывает, что в течение голоцена в одних районах отмечены более стабильные зимние климатические условия, в других зафиксирована явная тенденция повышения зимних температур воздуха от раннего к позднему голоцену. Для района низовий Колымы установлено, что

в течение голоцена среднеянварские температуры воздуха были довольно стабильными и близкими к современным, незначительное похолодание отмечено для мегхалайского периода [Vasil'chuk, Budantseva, 2022]. Для некоторых районов Северной Якутии показано, что зимние климатические условия в позднем голоцене существенно не изменились; общее ухудшение климатических условий обусловлено скорее снижением летних температур воздуха [Wetterich et al., 2009; Schwamborn et al., 2020]. Для востока Чукотки, региона дельты р. Лены и побережья Ойогосского Яра (пролив Дмитрия Лаптева) отмечена явная тенденция улучшения зимних климатических условий от раннего и среднего к позднему голоцену, при этом наиболее высокие значения зимних температур характерны для современного периода [Буданцева и др., 2020; Meyer et al., 2015; Opel et al., 2011].

ВЫВОДЫ

На севере Западной Сибири в пределах полуостровов Ямал, Гыданский и Тазовский повторно-жильные льды формировались на протяжении всего голоцена, их рост продолжается и в настоящее время. Установлено, что в пределах формирующихся торфяников повторно-жильные льды росли в течение гринландского – первой половины северогрип-

пианского периодов голоцена (между 11,4 и 6 тыс. кал. лет назад). В отложениях пойм, лайд, молодых торфяниках жилы формировались с конца северогриппианского – в течение всего мегхалайского периодов голоцена.

Для современных ледяных жилок отмечена устойчивая тенденция снижения значений $\delta^{18}\text{O}$ с запада на восток (от $-16,1$ до $-19,5\text{‰}$), что коррелирует с тенденцией снижения среднеянварской температуры воздуха ($T_{\text{ср. янв}}$) в этом направлении (от -22 до -26°C).

Карты изоскейп по голоценовым повторно-жильным льдам севера Западной Сибири показывают в целом субмеридиональное распределение значений $\delta^{18}\text{O}$ и их снижение с запада на восток, отмечаемое в течение каждого выделенного периода голоцена.

В течение гринландского и первой половины северогриппианского периодов голоцена (между 11,4 и 6 тыс. кал. лет назад) $T_{\text{ср. янв}}$ варьировала приблизительно от -21 до -30°C , с конца северогриппианского – в течение мегхалайского периодов голоцена (между 5,2 и 0,9 тыс. кал. лет назад) $T_{\text{ср. янв}}$ варьировала примерно от -24 до -27°C . Установлено субмеридиональное положение среднеянварских палеоизотерм, а также снижение значений $T_{\text{ср. янв}}$ с запада на восток для каждого выделенного периода голоцена.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда (грант № 23-17-00082).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баранская А.В., Романенко Ф.А., Арсланов Х.А. и др. Стратиграфия, возраст и условия формирования многолетнемерзлых отложений острова Белый // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII. № 2. С. 3–15.
- Буданцева Н.А., Маслаков А.А., Васильчук Ю.К. и др. Реконструкция зимней температуры воздуха раннего и среднего голоцена по изотопному составу ледяных жил восточного побережья полуострова Дауркина, Чукотка // Лед и Снег. 2020. Т. 60. № 2. С. 251–262. DOI: 10.31857/S2076673420020038.
- Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Суркова Г.В., Чиждова Ю.Н. О надежности палеотемпературно-изотопных уравнений Васильчука и становлении изотопной палеогеокриологии // Арктика и Антарктика. 2021. № 2. С. 1–26. DOI: 10.7256/2453-8922.2021.2.36145.
- Васильчук Ю.К., Суркова Г.В. Верификация соотношения изотопного состава повторно-жильных льдов и температуры холодного периода за последние 80 лет на севере криолитозоны России // Метеорология и гидрология. 2020. № 11. С. 84–91.
- Васильчук Ю.К., Шевченко В.П., Лисицын А.П. и др. Изотопно-кислородный и дейтериевый состав снежного покрова Западной Сибири на профиле от Томска до Обской губы // Доклады РАН. 2016. Т. 471. № 5. С. 770–775. DOI: 10.7868/S086956521635022X.
- Облогов Г.Е. Эволюция криолитозоны побережья и шельфа Карского моря в позднем неоплейстоцене – голоцене: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук / ИКЗ РАН. Тюмень, 2016. 24 с.
- Опокина О.Л., Слагода Е.А., Стрелецкая И.Д. и др. Криолитология, гидрохимия и микробиология голоценовых озерных отложений и повторно-жильных льдов о-ва Сибирякова Карского моря // Природа шельфов и архипелагов Европейской Арктики. 2010. Вып. 10. С. 241–247.
- Романенко Ф.А., Андреев А.А., Сулержицкий Л.Д. и др. Особенности формирования рельефа и рыхлых отложений западного Ямала и побережья Байдарацкой губы (Карское море) // Проблемы общей и прикладной геоэкологии Севера / под ред. В.И. Соломатина. М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 41–68.
- Слагода Е.А., Опокина О.Л., Рогов В.В., Курчатова А.Н. Строение и генезис подземных льдов в верхнеплейстоцен-голоценовых отложениях мыса Марре-Сале (Западный Ямал) // Криосфера Земли. 2012. Т. 16. № 2. С. 9–22.
- Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Слагода Е.А. и др. Полигонально-жильные льды на острове Сибирякова (Карское море) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2012. № 3. С. 57–63.

- Bronk Ramsey C. Bayesian analysis of radiocarbon dates, *Radiocarbon*, 2009, vol. 51(1), p. 337–360.
- Butzin M., Werner M., Masson-Delmotte V. et al. Variations of oxygen-18 in West Siberian precipitation during the last 50 years, *Atmos. Chem. Phys.*, 2014, vol. 14, p. 5853–5869, DOI: 10.5194/acp-14-5853-2014.
- Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation, *Tellus*, 1964, vol. 16, p. 436–468.
- Meyer H., Opel T., Laepple L. et al. Long-term winter warming trend in the Siberian Arctic during the mid- to late Holocene, *Nature Geoscience*, 2015, vol. 8, p. 122–125, DOI: 10.1038/NGEO2349.
- Opel T., Dereviagin A.Y., Meyer H. et al. Palaeoclimatic information from stable water isotopes of Holocene ice wedges on the Dmitrii Laptev Strait, northeast Siberia, Russia, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2011, no. 22, p. 84–100, DOI: 10.1002/ppp.667.
- Opel T., Meyer H., Wetterich S. et al. Ice wedges as archives of winter paleoclimate: A review, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2018, vol. 29(3), p. 199–209, DOI: 10.1002/ppp.1980.
- Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E. et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP), *Radiocarbon*, 2020, vol. 62, no. 4, p. 725–757, DOI: 10.1017/RDC.2020.41.
- Schwamborn G., Manthey C., Diekmann B. et al. Late Quaternary sedimentation dynamics in the Eenchime-Salaatinsky Crater, Northern Yakutia, *Arktos*, 2020, vol. 6(1), p. 75–92, DOI: 10.1007/s41063-020-00077-w.
- Tikhonravova Ya., Slogoda E., Butakov V. et al. Isotopic composition of heterogeneous ice wedges in peatlands of the Pur-Taz interfluvium (northern West Siberia), *Permafrost and Periglacial Processes*, 2022, vol. 33(2), p. 114–128, DOI: 10.1002/ppp.2138.
- 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, vol. 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, vol. 33(1), p. 3–17, DOI: 10.1002/ppp.2128.
- Walker M., Head M.J., Lowe J. et al. Subdividing the Holocene Series/Epoch: formalization of stages/ages and sub-series/subepochs, and designation of GSSPs and auxiliary stratotypes, *Journal of Quaternary Science*, 2019, vol. 34, no. 3, p. 173–186, DOI: 10.1002/jqs.3097.
- Wetterich S., Schirrmeister L., Andreev A.A. et al. Eemian and Late Glacial/Holocene palaeoenvironmental records from permafrost sequences at the Dmitry Laptev Strait (NE Siberia, Russia), *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, no. 279, p. 73–95, DOI: 10.1016/j.palaeo.2009.05.002.

Поступила в редакцию 20.10.2023

После доработки 05.12.2023

Принята к публикации 14.02.2024

ISOSCAPES AND PALEOISOTHERMS OF THE HOLOCENE MEAN JANUARY AIR TEMPERATURE IN THE NORTHWESTERN SIBERIA (BASED ON STABLE OXYGEN ISOTOPE COMPOSITION OF ICE WEDGES)

N.A. Budantseva¹, Yu.K. Vasil'chuk², A.C. Vasil'chuk³

^{1–3} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

¹ Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: nadin.budanceva@mail.ru

² Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Professor, D.Sc. in Geology and Mineralogy; e-mail: vasilch@geol.msu.ru

³ Laboratory of Geoecology of the North, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: alla-vasilch@yandex.ru

Holocene ice wedges at 16 sites in the Northwestern Siberia were studied, the age of ice wedges was determined, and stable isotope data ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values) for all studied ice wedges have been summarized. The $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ ratio and the d_{exc} values for ice wedge ice indicate good preservation of the isotope signal of winter precipitation in ice, which allows to use the obtained $\delta^{18}\text{O}$ values for paleotemperature reconstructions. The isoscapes (lines of equal $\delta^{18}\text{O}$ values) created for the Holocene ice wedges and modern ice veinlets are generally submeridional; the $\delta^{18}\text{O}$ values decrease from west to east of the study area. Taking into account a new Holocene tripartite division scheme it was shown that the mean January air temperature (T_{mj}) in the Northwestern Siberia ranged approximately from -21 to -30°C during Greenlandian and the first half of the Northgrippian stage of the Holocene (11,4 to 6 cal ka BP) and approximately from -24 to -27°C from the end of the Northgrippian – to the Meghalayan stage of the Holocene (5,2 to 0,9 cal ka BP). The Holocene isotherms are close to the modern submeridional position and show an eastward decrease in T_{mj} values. Winter climatic conditions in the Northwestern Siberia were generally stable during the Holocene, meanwhile T_{mj} was on average $1-2^\circ\text{C}$ lower than modern ones.

Keywords: ice wedges, oxygen isotopes, hydrogen isotopes, radiocarbon age

Acknowledgments. The research was financially supported by the Russian Science Foundation (grant 23-17-00082).

REFERENCES

- Baranskaya A.V., Romanenko F.A., Arslanov H.A. et al. Perennially frozen deposits of Belyi Island: stratigraphy, age, depositional environments, *Earth's Cryosphere*, 2018, vol. XXII(2), p. 3–15, DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-2(3-15).
- Bronk Ramsey C. Bayesian analysis of radiocarbon dates, *Radiocarbon*, 2009, vol. 51(1), p. 337–360.
- Budantseva N.A., Maslakov A.A., Vasil'chuk Yu.K. et al. Rekonstruktsiya zimnej temperatury vozduha rannego i srednego golotsena po izotopnomu sostavu ledyanyh zhil vostochnogo poberezhya poluostrova Daurkana, Chukotka [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*, 2020, vol. 60(2), p. 251–262, DOI: 10.31857/S2076673420020038. (in Russian)
- Butzin M., Werner M., Masson-Delmotte V. et al. Variations of oxygen-18 in West Siberian precipitation during the last 50 years, *Atmos. Chem. Phys.*, 2014, vol. 14, p. 5853–5869, DOI: 10.5194/acp-14-5853-2014.
- Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation, *Tellus*, 1964, vol. 16, p. 436–468.
- Meyer H., Opel T., Laepple L. et al. Long-term winter warming trend in the Siberian Arctic during the mid- to late Holocene, *Nature Geoscience*, 2015, vol. 8, p. 122–125, DOI: 10.1038/NNGEO2349.
- Oblogov G.E. *Evolyuciya kriolitozony poberezh'ya i shel'fa Karskogo morya v pozdnem neoplejstocene – golocene* [Evolution of permafrost of the Kara Sea coast and shelf in Late Pleistocene and Holocene], Ph.D. Thesis, 2016, p. 144 p. (in Russian)
- Opel T., Dereviagin A.Y., Meyer H. et al. Palaeoclimatic information from stable water isotopes of Holocene ice wedges on the Dmitrii Laptev Strait, northeast Siberia, Russia, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2011, vol. 22, p. 84–100, DOI: 10.1002/ppp.667.
- Opel T., Meyer H., Wetterich S. et al. Ice wedges as archives of winter paleoclimate: A review, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2018, vol. 29(3), p. 199–209, DOI: 10.1002/ppp.1980.
- Opokina O.L., Slagoda E.A., Streletskaya I.D. et al. [Cryolithology, hydrochemistry and microbiology of Holocene lake and ice wedge ice of the Sibiriyakov Island of Kara Sea], *Privroda shel'fov i arhipelagov Evropejskoj Arktiki* [The nature of the shelves and archipelagos of the European Arctic], 2010, iss. 10, p. 241–247. (in Russian)
- Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E. et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP), *Radiocarbon*, 2020, vol. 62(4), p. 725–757, DOI: 10.1017/RDC.2020.41.
- Romanenko F.A., Voskresenskiy K.S., Tarasov P.E. et al. [The relief and loose sediments forming features on the Western Yamal and Baydaratskaya Bay coast (Kara Sea)], *Problemy obshchej i prikladnoj geokologii Severa* [Problems of general and applied geocology of the North], VI. Solomatin (ed.), Moscow, MSU Publ., 2001, p. 41–68. (in Russian)
- Schwamborn G., Manthey C., Diekmann B. et al. Late Quaternary sedimentation dynamics in the Eenchime-Salaatinsky Crater, Northern Yakutia, *Arktos*, 2020, vol. 6(1), p. 75–92, DOI: 10.1007/s41063-020-00077-w.
- Slagoda E.A., Opokina O.L., Rogov V.V., Kurchatova A.N. Stroenie i genesis podzemnyh ldov v verhnepleistotsen-golotsenovyyh otlozheniyah mysa Marre-Sale (Zapadnyj Yamal) [Structure and genesis of the underground ice in the Neopleistocene-Holocene sediments of Marre-Sale Cape, Western Yamal], *Kriosfera Zemli*, 2012, vol. XVI(2), p. 9–22. (in Russian)
- Streletskaya I.D., Vasiliev A.A., Slagoda E.A. et al. Poligonalno-zhilnye ldy na ostrove Sibiriyakova (Karskoe more) [Polygonal ground-ice wedges on the Sibiriyakov Island (the Kara Sea)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2012, vol. 3, p. 57–63. (in Russian)
- Tikhonravova Ya., Slagoda E., Butakov V. et al. Isotopic composition of heterogeneous ice wedges in peatlands of the Pur-Taz interfluvium (northern West Siberia), *Permafrost and Periglacial Processes*, 2022, p. 1–15, DOI: 10.1002/ppp.2138.
- Vasil'chuk Y.K., Shevchenko V.P., Lisitzin A.P. et al. Oxygen isotope and deuterium composition of snow cover on the profile of Western Siberia from Tomsk to the Gulf of Ob, *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 471(2), p. 1284–1287, DOI: 10.1134/S1028334X1612014X.
- Vasil'chuk Y.K., Surkova G.V. Verification of the relationship between the isotopic composition of ice wedges and cold-season temperature over the recent 80 years in the northern permafrost zone of Russia, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020, vol. 45(11), p. 791–796, DOI: 10.3103/S1068373920110060.
- Vasil'chuk A.C., Budantseva N.A., Surkova G.V., Chizhova Ju.N. O nadezhnosti paleotemperaturno-izotopnykh uravnenij Vasilchuka i stanovlenii izotopnoj paleogeokriologii [On the reliability of Vasil'chuk's paleotemperature-isotopic equations and the formation of isotopic paleogeocryology], *Arktika i Antarktika*, 2021, vol. 2, p. 1–25, DOI: 10.7256/2453-8922.2021.2.36145. (in Russian)
- 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, vol. 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, vol. 33(1), p. 3–17, DOI: 10.1002/ppp.2128.
- Walker M., Head M.J., Lowe J. et al. Subdividing the Holocene Series/Epoch: formalization of stages/ages and subseries/subepochs, and designation of GSSPs and auxiliary stratotypes, *Journal of Quaternary science*, 2019, vol. 34(3), p. 173–186, DOI: 10.1002/jqs.3097.
- Wetterich S., Schirmermeister L., Andreev A.A. et al. Eemian and Late Glacial/Holocene palaeoenvironmental records from permafrost sequences at the Dmitry Laptev Strait (NE Siberia, Russia), *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, vol. 279, p. 73–95, DOI: 10.1016/j.palaeo.2009.05.002.

Received 20.10.2023

Revised 05.12.2023

Accepted 14.02.2024