

ОЦЕНКА ПОДОБИЯ ИЗОТОПНЫХ ДИАГРАММ ПО ДВУМ СИНХРОННЫМ СОСЕДНИМ ЛЕДЯНЫМ ЖИЛАМ БАТАГАЙСКОЙ ЕДОМЫ

Ю.К. Васильчук¹, А.К. Васильчук², Н.А. Буданцева³, Дж.Ю. Васильчук⁴, А.П. Гинзбург⁵

^{1–5} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

¹ Кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, проф., д-р. геол.-минерал. наук; e-mail: vasilch_geo@mail.ru

² Лаборатория геоэкологии Севера, вед. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: alla-vasilch@yandex.ru

³ Кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук;
e-mail: nadin.budanceva@mail.ru

⁴ Лаборатория геоэкологии Севера, мл. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: jessica.vasilchuk@gmail.com

⁵ Лаборатория геоэкологии Севера, мл. науч. сотр.; e-mail: alexandrginzburg13154@yandex.ru

Проведено исследование детальных изотопных диаграмм, построенных по значениям $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ по двум параллельным и синхронным сингенетическим ледяным жилам (ПЖЛ-17 и ПЖЛ-20), вскрываемым в верхней 20-метровой части обнажения Батагайской едомы на севере Якутии. Согласно новым ^{14}C AMS датировкам органического материала, экстрагированного из льда, жилы начали накапливаться не позднее 42 тыс. кал. лет назад, их формирование существенно замедлилось около 26 тыс. кал. лет назад и завершилось около 11 тыс. кал. лет назад. По льду исследованных жил получены весьма низкие значения изотопного состава: средние значения $\delta^{18}\text{O}$ варьировали от -31 до $-36,2\text{‰}$, значения $\delta^2\text{H}$ изменялись от -232 до -283‰ . Сопоставление детальных изотопных кривых по двум соседним жилам позволило выделить фрагменты на одних и тех же глубинах, в которых изотопные значения очень близки, и фрагменты, где изотопные данные различаются на $1\text{--}2\text{‰}$ по значениям $\delta^{18}\text{O}$ и более чем на 10‰ по значениям $\delta^2\text{H}$. Различия в изотопном составе на одной глубине может быть обусловлено разной частотой растрескивания жил на данном этапе их формирования, связанной с достижением оптимальной ширины, при котором растрескивание происходит более интенсивно. Более низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ льда ПЖЛ-20 по сравнению с ПЖЛ-17 на определенной глубине, возможно, указывает на принадлежность этих жил к разным полигональным системам: жила первичной генерации (ПЖЛ-17) растрескивалась чаще, в то время как жила вторичной генерации (ПЖЛ-20), располагающаяся внутри первичной полигональной сети, растрескивалась только в наиболее суровые зимы. Показано, что жилы Батагайской едомы в период между 42 и 26 тыс. кал. лет назад формировались в суровых зимних условиях позднеледникового криохрона, среднеянварская температура воздуха в период роста жил варьировала в среднем от -47 до -53°C , на начальных этапах каждого цикла развития жил растрескивание и их рост происходили, как правило, в более холодные зимы.

Ключевые слова: повторно-жильный лед, северная Якутия, изотопы кислорода и водорода, радиоуглеродный возраст, поздний плейстоцен, среднеянварская палеотемпература

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.3.7

ВВЕДЕНИЕ

Массивы с повторно-жильными льдами активно изучаются уже более 100 лет, начиная с работ А.А. Бунге [1895] и Э. де К. Леффингвелла [Leffingwell, 1915]. Наиболее достоверные и информативные палеогеокриологические результаты получены в последние десятилетия благодаря применению изотопно-кислородных и дейтериевых исследований повторно-жильного льда [Васильчук, 1992; Meyer et al., 2015; Opel et al., 2017, 2018] и радиоуглеродного датирования, включая прямое датирование льда жил с применением метода AMS [Vasil'chuk et al., 2000; Murton et al., 2022; Iwahana et al., 2024].

Для развития изотопных исследований повторно-жильных льдов (ПЖЛ) авторами разработан новый подход, который заключается в сравнении изотопно-кислородных и дейтериевых кривых, полученных по двум параллельным и квази-синхронным повторно-жильным льдам, и вскрываемых единым обнажением в едомной толще. В результате получают достоверные диапазоны значений изотопного состава, что в сочетании с возрастной привязкой получаемых изотопных распределений дает полную картину изотопных вариаций в ледяных жилах в течение определенного периода их формирования. Это позволяет рассчитывать как средние, так и экстремально низкие палеотемпературы на

основании изотопных данных и способствует решению одной из главных проблем, возникающих при изучении позднеплейстоценовых едомных толщ, – определению точности палеотемпературной интерпретации изотопной записи.

Одним из принципиальных вопросов при изучении мощных сингенетических повторно-жильных льдов в едоме является глубина проникновения морозобойных трещин. По данным Б.И. Втюрина стандартная глубина трещин составляет 3–5 м [Втюрин, 1975], но в крупных насыщенных льдом массивах глубина проникновения трещин может резко возрастать. Полевое исследование нескольких десятков мощных ледяных жил в центральной Якутии позволило П.А. Шумскому [1952, 1959] совместно с Б.И. Втюриным и Е.М. Катасоновым утверждать, что в экстремально холодном климате Якутии морозобойные трещины и элементарные жилки в них, формирующиеся в позднем плейстоцене, могли достигать глубины 7–8 м. Едомная толща Батагайского термоцирка представлена очень длинными, часто расположенными ледяными жилами, что говорит о глубоком растрескивании в период формирования жил.

Направление роста жил по латерали, как правило, достаточно произвольное: влево или вправо от оси жилы, при этом образование каждой новой трещины может происходить как в центре жилы, так и на периферии и даже на контакте льда с вмещающей породой. Треугольная форма во фронтальном сечении обычно подтверждает, что ледяная жила растрескивалась преимущественно в центральной области. Возраст льда жилы, как правило, уменьшается снизу-вверх, а также по горизонтали, но достоверно установить, в какую сторону возраст уменьшается, опираясь на особенности структуры ледяной жилы, не представляется возможным. Единственный способ определить последовательность образования той или иной жилы – измерить радиоуглеродный возраст органики из льда методом AMS. Это особенно актуально для мощных толщ позднеплейстоценовых отложений, т. к. в процессе их формирования происходит размыв, переотложение и перемещение грунта по мере роста ледяных жил. Иногда расхождение возраста вмещающих отложений и повторно-жильных льдов может достигать десятков тысяч лет [Iwahana et al., 2024].

Основная задача данной работы – сравнить результаты изотопного анализа, полученные по двум параллельным и синхронным повторно-жильным льдам, вскрытым в едином обнажении в верхней части Батагайской едомы, и проанализировать их прецизионность, т. е. меру близости независимых результатов изотопного исследования двух жил, их сходства и различий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Батагайский мегаовраг, расположенный в Верхоянском улусе Якутии, в 10 км от пос. Батагай (67,58° с. ш., 134,77° в. д.), является самым мощным обнажением едомной толщи: его высота достигает 100 м, протяженность более 2 км в длину и около 1 км в ширину.

В сентябре 2019 г. в обнажении в устьевой части термоэрозионного оврага, вскрывающегося в юго-восточной части Батагайского кратера, выполнено детальное исследование структуры льда двух протяженных ледяных жил: ПЖЛ-17 и ПЖЛ-20, расположенных параллельно друг другу на расстоянии от 5 до 10 м и рассекающих едомную толщу до глубины более 20 м (рис. 1).

Отбор образцов льда для изотопного анализа произведен параллельно из двух жил до глубины 13,1 м, ниже – только по жиле ПЖЛ-17, до глубины 22,1 м. Образцы льда отбирались из ледяных жил с помощью дрелей Makita DDF481rte 18B и Bosch GSR 36 VE-2-LI с титановыми коронками диаметром 51 мм. Образцы для изотопного анализа были отобраны из жил вдоль вертикальной и горизонтальной осей с шагом около 10 см. Образцы льда растапливались на месте в двойных пластиковых пакетах, затем переливались в пластиковые флаконы объемом 25 мл, плотно закрывались и запечатывались пленкой для минимизации испарения. До измерений образцы воды хранились в прохладных условиях.

Образцы льда для ^{14}C датирования отбирались максимально близко к осевой части жилы. Каждый образец льда для ^{14}C датирования очищался от поверхностных загрязнений и промывался чистой талой водой, полученной при таянии того же образца льда, затем растапливался при температуре около 5°C в течение 24 часов. Органический остаток собирали в пластиковые флаконы.

Радиоуглеродное датирование образцов микровключений органического материала, экстрагированного непосредственно из ледяных жил, проведено в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН и Центре прикладных изотопных исследований Университета Джорджии (США). Калибровка всех полученных 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).

Измерения изотопного состава кислорода и водорода во льду выполнены в режиме постоянного потока гелия (CF-IRMS) на масс-спектрометре Finnigan Delta-V Plus с использованием комплекса газ-бенч в лаборатории стабильных изотопов гео-

графического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Для калибровки измерений использовались международные стандарты V-SMOW, GRES, SLAP. Погрешность определений составила $\pm 1\%$ для $\delta^2\text{H}$ и $\pm 0,4\%$ для $\delta^{18}\text{O}$.

Для расчета среднеянварских позднеплейстоценовых палеотемператур воздуха было применено уравнение, полученное Ю.К. Васильчуком [Васильчук, 1992] для российской криолитозоны:

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

где $T_{\text{ср.январь}}$ – 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 и естественную средне- и долговременную изменчивость среднеянварской температуры воздуха в каждом пункте наблюдений [Васильчук и др., 2021].

Наклон линии соотношения $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ для жильного льда рассматривается как индикатор возможной трансформации первичного изотопного сигнала снега (являющегося основным источником воды

для формирования жильного льда) в процессе испарения, сублимации и смешения с водой неатмосферного происхождения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Радиоуглеродное датирование и определение возраста ПЖЛ. По не идентифицированным органическим микроостаткам во льду ПЖЛ-17 получены четыре радиоуглеродные AMS датировки (рис. 2, табл. 1): на глубине 3,3 м из осевой части ледяной жилы получена ^{14}C AMS дата 26 140 кал. лет, на глубине 12,3 м получена дата 29 100 кал. лет, на глубине 21,1 м в осевой части ПЖЛ получена дата 42 220 кал. лет. Из супеси с органическими включениями непосредственно над жилой на глубине 1,3 м получена дата 10 510 тыс. кал. лет (табл. 1).

Полученные датировки позволяют с большой долей вероятности заключить, что исследованные мощные сингенетические повторно-жильные льды, вскрывающиеся в верхней 20-метровой части обнажения Батагайской едомы, начали накапливаться не позднее 42 тыс. кал. лет назад, их формирование существенно замедлилось около 26 тыс. кал. лет назад, а завершилось около 11 тыс. кал. лет назад.



Рис. 1. Ледяные жилы ПЖЛ-17 и ПЖЛ-20 в обнажении Батагайской едомы

Fig. 1. Ice wedges IW-17 and IW-20 in the outcrop of the Batagay yedoma

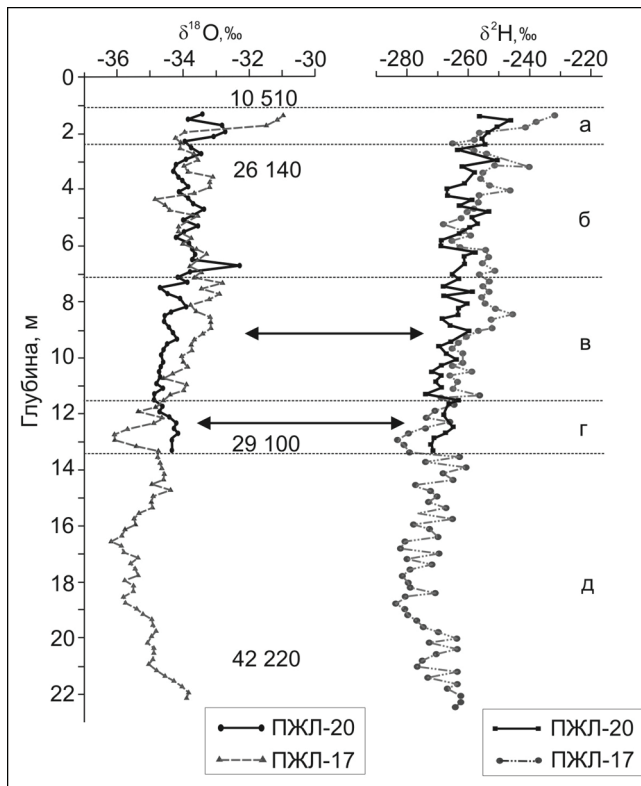


Рис. 2. Сопоставление диаграмм распределения значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ во льду ПЖЛ-17 и ПЖЛ-20 Батагайской едомы в выделенных горизонтах: а – 1,3–1,7 м; б – 1,9–7,1 м; в – 7,3–11,5 м; г – 11,7–13,1 м; д – 13,3–22,1 м. Стрелками показаны интервалы с наиболее выраженным расхождением изотопных значений

Fig. 2. Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ diagrams for the ice wedges IW-17 and IW-20 of the Batagay Yedoma in the selected depth intervals: а – 1,3–1,7 m; б – 1,9–7,1 m; в – 7,3–11,5 m; г – 11,7–13,1 m; д – 13,3–22,1 m. The arrows show the intervals with the most pronounced difference in isotope values

Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ во льду ПЖЛ.

Для анализа изотопных данных по двум ледяным жилам на основании сходства и различия изотопных распределений мы разделили изотопные диаграммы

по глубине на пять характерных фрагментов: а) 1,3–1,7 м; б) 1,9–7,1 м; в) 7,3–11,5 м; г) 11,7–13,1 м, а в более мощной жиле ПЖЛ-17 дополнительно выделен фрагмент д) 13,3–22,1 м (табл. 2, см. рис. 2).

Во фрагменте а) значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ изменяются практически синхронно в обеих жилах, но при этом изотопные значения в жиле 17 более высокие, чем в жиле 20 в среднем на 2‰ по значениям $\delta^{18}\text{O}$ и на 14‰ по значениям $\delta^2\text{H}$. Во фрагменте б) значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ изменяются практически синхронно в обеих жилах. Во фрагменте в) значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, как правило, более высокие в ПЖЛ-17 по сравнению с ПЖЛ-20, в среднем на 1‰ по значениям $\delta^{18}\text{O}$ и на 7‰ по значениям $\delta^2\text{H}$. Во фрагменте г) получены экстремально низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ для ПЖЛ-17 – среднее значение $\delta^{18}\text{O} = -35,36\text{‰}$, наиболее низкое $-36,07\text{‰}$ (см. табл. 2).

Наклон линии соотношения $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ во льду составляет 9,4 для ПЖЛ-17 и 7,3 для ПЖЛ-20 (рис. 3). Значения наклонов линий соотношения $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ во льду жил немного отличаются от наклона для глобальных осадков – глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ), наклон которой равен 8.

Изотопные данные по льду жил ПЖЛ-17 и ПЖЛ-20 довольно близки к данным по изотопному составу ПЖЛ верхнего яруса Батагайской едомы, полученным корейскими и немецкими исследователями [Park et al., 2024]: значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют в диапазоне от $-36,6$ до $-33,1\text{‰}$, значения $\delta^2\text{H}$ – от $-284,7$ до $-259,3\text{‰}$, соотношение $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ описывается уравнением $\delta^2\text{H} = 9,31\delta^{18}\text{O} + 54,24$, близким к уравнению для ПЖЛ-17 (см. рис. 3). Низкие значения изотопного состава (средние значения $\delta^{18}\text{O}$ около $-29, -30\text{‰}$) были получены для сингенетических повторно-жильных льдов ледового комплекса в обнажениях Тыталычима и Мамонтова гора в центральной Якутии [Торговкин и др., 2023], что отражает суровые зимние условиях позднеледниковой эпохи.

Таблица 1

Радиоуглеродные AMS датировки образцов органического материала из ледяной жилы ПЖЛ-17 Батагайской едомы

Полевой номер	Глубина (высота над уровнем моря), м	Лабораторный индекс	^{14}C возраст (лет назад) (1σ)	Калиброванный ^{14}C возраст, кал. лет назад*	Медианное значение возраста, кал. лет назад
B-VV-2019/364	1,3 (309,0)	IGAN -7462 _{AMS}	9305±30	10 650–10 380	10 510±60
B-VV-2019/174	3,3 (307,0)	IGAN -9096 _{AMS}	21 900±60	26 350–25 940	26 140±110
B-VV-2019/281	12,3 (298,0)	IGAN -9097 _{AMS}	24 870±80	29 230–28 870	29 100±90
B-VV-2019/359	21,1 (289,2)	IGAN -7464 _{AMS}	37 860±160	42 380–42 050	42 220±80

Примечание. *Возрастной интервал с вероятностью 95,4%.

Мы не можем полностью исключить влияние изотопного фракционирования (скорее всего, в результате сублимации) на первичный изотопный сигнал зимних осадков в период формирования ПЖЛ-17 и ПЖЛ-20, поэтому значения среднеянварской палеотемпературы, рассчитанные по уравнению (1), являются приблизительными, скорее оценочными.

Сопоставление синхронных фрагментов изотопных диаграмм в ПЖЛ-17 и ПЖЛ-20. На основании полученных по льду ПЖЛ-17 ¹⁴С датировок рассчитана приблизительная скорость накопления жильного льда, и примерно определены периоды формирования выделенных фрагментов исследо-

ванных жил (см. табл. 2). Расстояние между двумя ¹⁴С датировками микроорганических включений, полученными из осевой части ПЖЛ-17 (42,22 и 26,14 тыс. кал. лет), составило 17,8 м, т. е. этот фрагмент ледяной жилы накопился за 16,08 тыс. лет, средняя скорость формирования жилы составила 1,1 м за 1 тыс. лет. Что касается датировки 29,1 кал. тыс. лет на глубине 12,3 м, то поскольку образец отобран в 0,5 м слева от оси жилы, то можно предположить, что в этот период растрескивание было более глубоким.

Наиболее сложным для интерпретации представляется расхождение изотопных значений ПЖЛ-17 и

Таблица 2

Приблизительный возраст выделенных фрагментов ПЖЛ-17 и ПЖЛ-20 Батагайской едомы и значения δ¹⁸O и δ²H (минимальные, средние и максимальные) во льду жил

Возраст фрагмента жил, тыс. лет	Интервал глубин фрагмента, м	δ ¹⁸ O, ‰			δ ² H, ‰		
		Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.
ПЖЛ-17							
23,0–22,4	1,3–1,7	–31,49	–30,99	–31,2	–241,1	–231,8	–237
28,2–23,2	1,9–7,1	–34,85	–33,1	–33,82	–267,9	–240,3	–256,8
32,6–28,4	7,3–11,5	–34,58	–32,83	–33,71	–268,5	–245,7	–259,3
34,8–32,8	11,7–13,1	–36,07	–34,59	–35,36	–270,6	–266,1	–275,9
44–35	13,3–22,1	–36,16	–33,84	–35,1	–283,2	–260,7	–272,2
ПЖЛ-20							
23,0–22,4	1,3–1,7	–33,86	–32,82	–33,37	–255,7	–246,1	–251
28,2–23,2	1,9–7,1	–34,29	–32,27	–33,74	–269	–251,5	–260,1
32,6–28,4	7,3–11,5	–34,87	–33,87	–34,5	–273,9	–258,8	–266
34,8–32,8	11,7–13,1	–34,71	–34,16	–34,4	–271,8	–264,9	–268,5

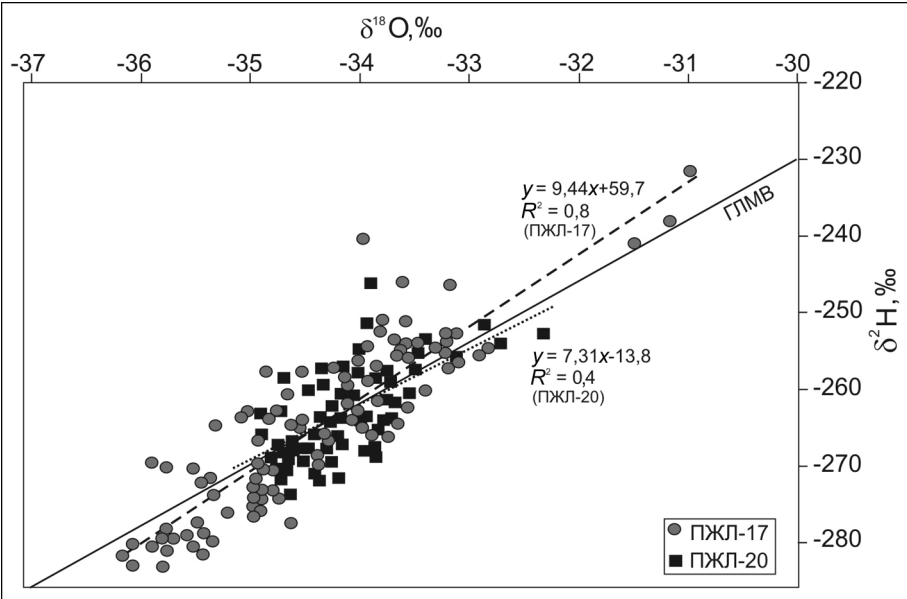


Рис. 3. Соотношение значений δ²H–δ¹⁸O во льду ПЖЛ-17 и ПЖЛ-20 Батагайской едомы. ГЛМВ – глобальная линия метеорных вод

Fig. 3. δ²H–δ¹⁸O ratio for the ice of IW-17 and IW-20 of the Batagay yedoma. ГЛМВ – is a global meteoric water line

ПЖЛ-20 во фрагментах в) и г), т. е. в интервалах глубин 7,3–11,5 м и 11,7–13,1 м, где разница в значениях $\delta^{18}\text{O}$ составляет от 0,29 до 1,36‰ (см. табл. 2). Изотопное распределение заметно различается графически (см. рис. 2). Наиболее вероятным объяснением этого представляется неодновременное растрескивание двух соседних жил. Как было показано Е.Е. Подборным [1978], Дж. Росс Маккаем [Maskau, 2000], при ежегодном растрескивании в первую очередь растрескиваются жилы оптимальных размеров. Как правило, это узкие жилы, а те ледяные жилы, которые достигли некоторой предельной для данной полигональной системы ширины, растрескиваются только при наиболее благоприятных для морозобойного растрескивания условиях. Отметим высокую чувствительность полигонально-жилных систем к кратковременным колебаниям климата. Даже небольшие изменения среднегодовых температур, а тем более среднезимних и среднеянварских, ведут к вариациям режима растрескивания полигональных систем. Согласно наблюдениям С. Ганьона и М. Алларда [Gagnon, Allard, 2020] на севере Канады, даже небольшое снижение среднегодовых температур воздуха в 2010 г. привело к возобновлению растрескивания у половины наблюдаемых ледяных жил, рост которых остановился после 1992 г. Активное растрескивание наблюдалось здесь также в период похолодания с 1946 по 1992 г., когда значения среднегодовых температур воздуха находились в интервале от $-7,8$ до $-8,9^\circ\text{C}$ [Allard, Kasper, 1998].

Можно предположить, что в период формирования фрагмента в) в интервале глубин 7,3–11,5 м жила ПЖЛ-17 имела оптимальные размеры для растрескивания, поэтому она растрескивалась и в более, и в менее суровые зимы, в то время как ПЖЛ-20 достигла предельной для того момента ширины и подвергалась растрескиванию только в наиболее суровые зимы, на это указывает и меньшая высота ПЖЛ-20. Альтернативным объяснением различий изотопного распределения во льду соседних жил может быть предположение, что ПЖЛ-20 является жилой генерации более высокого уровня по отношению к ПЖЛ-17, т. е. ПЖЛ-20 формировалась внутри полигона первичной генерации большего размера, одна из сторон которого была образована ПЖЛ-17. Нельзя исключить, что в более суровые зимы морозобойные трещины могли проникать глубже и быть шире. Поэтому в ПЖЛ-20 в интервале глубин 7,3–11,5 м активно накапливался лед более суровых зим. Тогда как в ПЖЛ-17 в этот период растрескивание имело нормальную глубину из-за стабилизировавшегося режима растрескивания, обусловленного оптимальной шириной жилы. Полигональная сеть, состоящая из нескольких генераций ледяных жил, описана, например, в самых северных

частях полуострова Унгава, северный Квебек, Канада [Chiasson, Allard, 2021]. Формирование вложенной более молодой сети авторы связывают с более холодными климатическими эпизодами в позднем голоцене.

По наблюдениям Е.Е. Подборного, для растрескивания ледяной жилы оптимальной является ширина около 1 м, т. е. жилы шириной около 1 м растрескиваются чаще, чем жилы, ширина которых больше или меньше 1 м. Жилы Батагая близки по размерам к оптимальным, их ширина варьирует в пределах 1–1,5 м во фронтальном разрезе. Конечно, можно предположить, что в позднем плейстоцене оптимальная для растрескивания ширина жил могла быть другой, однако в районе Батагая экстремально холодные годы в современный период по степени суровости могут приближаться к позднеплейстоценовым: так, например, в 1982 г. среднеянварская температура в Батагае составила -51°C . Отметим также важный момент, что достижение полигональной системой режима стабилизации нивелируется последующим накоплением вмещающих отложений. В процессе накопления сингенетических отложений ледяные жилы ПЖЛ-17 и ПЖЛ-20 росли вверх так, что более молодой жильный лед накапливался выше более древнего, поскольку при накоплении новых порций вмещающих отложений новые морозобойные трещины не достигали глубины трещин предшествующего цикла. В силу различия в частоте растрескивания ПЖЛ-17 и ПЖЛ-20 соотношение ширины ледяных жил не оставалось постоянным. Как правило, более широкой в тот или иной момент времени была та жила, которая растрескивалась интенсивнее. Лед в результате этого интенсивного растрескивания имел более осредненный изотопный состав, так как эта жила растрескивалась и в более мягкие, и в более суровые зимы. Тогда как ледяная жила, растрескивавшаяся преимущественно в более суровые зимы, накапливала лед с более легким изотопным составом. Однако при достижении некой критической ширины (для едомы Батагая это 1,5–2,0 м) частота растрескивания снижалась. В то же время менее активно формировавшаяся жила, вследствие приближения к оптимальной ширине для растрескивания, начинала накапливаться более интенсивно. Ее изотопный состав становился более тяжелым, как правило, на 1–2‰ (для значений $\delta^{18}\text{O}$). Это приводило к дополнительной неравномерности изотопного состава ПЖЛ-17 и ПЖЛ-20.

Выявленное не совсем синхронное распределение изотопных характеристик ПЖЛ-17 и ПЖЛ-20 позволяет говорить о необходимости расширения диапазона как изотопных данных, так и реконструируемых зимних температур, а также выделения как

часто встречающихся значений, так и экстремальных в том или ином интервале.

Для выделенных фрагментов жил ПЖЛ-17 и ПЖЛ-20 это может выглядеть следующим образом. Для фрагмента а) (глубина 1,3–1,7 м) изотопные распределения в двух жилах похожи, но средние значения $\delta^{18}\text{O}$ ПЖЛ-17 и ПЖЛ-20 различаются на 2‰. Среднеянварская температура варьировала примерно от -47 до -50°C в период приблизительно 23–22,4 тыс. лет назад. На наш взгляд это яркая иллюстрация различия частоты растрескивания ПЖЛ-17 и ПЖЛ-20: ПЖЛ-17 растрескивалась чаще, а ПЖЛ-20 только в суровые зимы. Во льду жил фрагмента б) (глубина 1,9–7,1 м) значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ изменяются практически синхронно в обеих жилах, различия изотопного состава незначительны, средние значения $\delta^{18}\text{O}$ различаются на 0,08‰ (см. табл. 2). Среднеянварская температура в интервале 28,2–23,2 тыс. лет назад составляла около -51°C . Очевидно, что ПЖЛ-17 и ПЖЛ-20 растрескивались в одном режиме. Во фрагменте в) (глубина 7,3–11,5 м) наблюдается противоположное распределение изотопных значений, при этом значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, как правило, более низкие в ПЖЛ-20 по сравнению с ПЖЛ-17. В период 32,6–28,4 тыс. лет назад среднеянварская температура воздуха варьировала примерно от -51 до -52°C . Вероятно, ПЖЛ-17 имела в этом интервале оптимальную ширину и растрескивалась чаще, в то время как ПЖЛ-20 росла только в суровые зимы. Для фрагмента г) (глубина 11,5–13,1 м) получены экстремально низкие средние значения $\delta^{18}\text{O}$ для ПЖЛ-17, в то время как для ПЖЛ-20 среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ близко к значению в интервале в). В период 34,8–32,8 тыс. лет назад среднеянварская температура, скорее всего, варьировала от -52 до -53°C , в более суровые зимы происходило растрескивание ПЖЛ-17. Во фрагменте д) (глубина 13,3–22,1 м), представленном только в ПЖЛ-17, средняя величина $\delta^{18}\text{O} = -35,12\text{‰}$ оказалась самым низким средним значением. Среднеянварская температура в период 44,0–35,0 тыс. лет назад составляла в среднем -53°C . Таким образом, на начальном этапе формирования ПЖЛ-17 ее рас-

трескивание и рост активно происходили только на наиболее суровые зимы, т. к. жила была еще довольно узкой и не достигла оптимальных для растрескивания размеров.

ВЫВОДЫ

В исследованном фрагменте Батагайской едомы сингенетические ледяные жилы высотой более 20 м, шириной в верхней части до 2,5 м активно формировались в период между 42(44) и 26(22) тыс. лет назад. Сопоставление детальных изотопных записей двух соседних сингенетических ледяных жил (ПЖЛ-17 и ПЖЛ-20) позволило выделить фрагменты на одних и тех же глубинах, в которых изотопные значения очень близки, и фрагменты, где на одних и тех же глубинах изотопные данные различаются на 1–2‰ для значений $\delta^{18}\text{O}$ и более чем на 10‰ для значений $\delta^2\text{H}$. Существенные различия изотопного сигнала из соседних ледяных жил на одних и тех же глубинах, вероятнее всего, обусловлены принадлежностью этих жил к разным полигональным системам: ПЖЛ-17 к полигональной системе первичной генерации, ПЖЛ-20 к полигональной системе второй генерации, располагающейся внутри первичной полигональной сети. Это приводило к более редкому растрескиванию вторичной полигональной сети, которое происходило только в наиболее суровые зимы. Изотопная характеристика соседних параллельных ледяных жил позволяет расширить диапазон палеотемпературных реконструкций и получить информацию как о средних, так и об экстремальных температурах зимнего периода для того или иного промежутка времени, в течение которого формировались жилы. Показано, что жилы Батагайской едомы в период между 42(44) и 26(22) тыс. лет назад формировались в суровых зимних условиях позднего плейстоцена, когда приблизительная среднеянварская температура воздуха варьировалась в среднем от -47 до -53°C . Циклический характер изотопных кривых и вариации изотопных значений, возможно, говорят о том, что на начальных этапах каждого цикла формирования жил растрескивание и их рост происходили, как правило, в условиях более холодных зим.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда (грант № 23-17-00082). Авторы благодарят Э.П. Зазовскую за AMS радиоуглеродные определения, а также А.Ю. Тришина и Е.С. Слышкину за помощь в полевых работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бунге А.А. Описание путешествия к устью р. Лены 1881–1884 гг. // Труды Русск. полярной станции на устье Лены. Ч. I. Приложение. СПб., 1895. С. 1–96.
Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Суркова Г.В. и др. О на-

дежности 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. 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.
- Втюрин Б.И. Подземные льды СССР. М., 1975. 214 с.
- Подборный Е.Е. Время и интенсивность образования морозобойных трещин // Проблемы криолитологии. Вып. VII. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. С. 132–140.
- Торговкин Н.В., Сивцев Д.Е., Платонов И.А. и др. Стабильные изотопы кислорода и водорода в неоплейстоценовых повторно-жильных льдах Якутии // Актуальные проблемы и перспективы развития гео-криологии: материалы VII Всероссийского научного молодежного геокриологического форума с международным участием, Якутск, Россия, 27 июня – 07 июля 2023 г. С. 88–91.
- Шумский П.А. Исследование ископаемых льдов Центральной Якутии // Исследование вечной мерзлоты в Якутской республике. Вып. 3. М.: Изд-во АН СССР, 1952. С. 142–161.
- Шумский П.А. Подземные льды // Основы гео-криологии (мерзловедения): В 3 ч. Ч. 1: Общая гео-криология. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 274–326.
- Allard M., Kasper J.N. Temperature conditions for ice wedge cracking: field measurements from Salluit, northern Québec, *Permafrost*, Proceedings, 7th International Conference, Yellowknife, Canada, Centre d'études nordiques, Université Laval, Collection Nordicana, 1998, vol. 57, p. 5–11.
- Bronk Ramsey C. Bayesian analysis of radiocarbon dates, *Radiocarbon*, 2009, vol. 51(1), p. 337–360.
- Chiasson A., Allard M. Thermal contraction crack polygons in Nunavik (northern Quebec): Distribution and development of polygonal patterned ground, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2022, vol. 33, iss. 3, p. 195–213, DOI: 10.1002/ppp.2150.
- Iwahana G., Uchida M., Horiuchi K. et al. Radiocarbon ages of plant remains in massive ground ice and underlying sediments of the Barrow permafrost tunnel, Alaska, *Radiocarbon*, 2024, p. 1–13, DOI: 10.1017/RDC.2024.25.
- Gagnon S., Allard M. Changes in ice-wedge activity over 25 years of climate change near Salluit, Nunavik (northern Québec, Canada), *Permafrost and Periglacial Processes*, 2020, vol. 31(1), p. 69–84, DOI: 10.1002/ppp.2030.
- Leffingwell E.K. Ground-ice wedges: the dominant form of ground-ice on the north coast of Alaska, *The Journal of Geology*, 1915, vol. 23(7), p. 635–654.
- Mackay J.R. Thermally induced movements in ice-wedge polygons, Western Arctic coast: a long-term study, *Géographie Physique et Quaternaire*, 2000, vol. 54(1), p. 41–68, DOI: 10.7202/004846ar.
- Meyer H., Opel T., Laepple T. et al. Long-term winter warming trend in the Siberian Arctic during the mid- to late Holocene, *Nature Geoscience*, 2015, vol. 8, no. 2, p. 122–125, DOI: 10.1038/ngeo2349.
- Murton J.B., Opel T., Toms P. et al. A multimethod dating study of ancient permafrost, Batagay megaslump, east Siberia, *Quaternary Research*, 2022, vol. 105, p. 1–22, DOI: 10.1017/qua.2021.27.
- Opel T., Meyer H., Wetterich S. et al. Ice wedges as archives of winter paleoclimate: A review, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2018, vol. 29, no. 3, p. 199–209, DOI: 10.1002/ppp.1980.
- Opel T., Wetterich S., Meyer H. et al. Ground-ice stable isotopes and cryostratigraphy reflect late Quaternary palaeoclimate in the Northeast Siberian Arctic (Oyogos Yar coast, Dmitry Laptev Strait), *Climate of the past*, 2017, vol. 13, p. 587–611, DOI: 10.5194/cp-13-587-2017.
- Park H., Ko N.-Y., Kim J. et al. A biogeochemical study of greenhouse gas formation from two ice complexes of Batagay megaslump, East Siberia, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2024, vol. 35, p. 437–449, DOI: 10.1002/ppp.2234.
- 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.
- Vasil'chuk Yu.K., Plicht van der J., Jungner H. et al. First direct dating of Late Pleistocene ice-wedges by AMS, *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, vol. 179, no. 2, p. 237–242, DOI: 10.1016/S0012-821X(00)00122-9.

Поступила в редакцию 25.11.2024

После доработки 05.01.2025

Принята к публикации 12.03.2025

ESTIMATION OF THE SIMILARITY OF ISOTOPE DIAGRAMS FROM TWO SYNCHRONOUS ADJACENT ICE WEDGES OF THE BATAGAY YEDOMA

Yu.K. Vasil'chuk¹, A.C. Vasil'chuk², N.A. Budantseva³, J.Yu. Vasil'chuk⁴, A.P. Ginzburg⁵

^{1–5} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

¹ Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Professor, D.Sc. in Geology and Mineralogy; e-mail: vasilch@geol.msu.ru

² Laboratory of Geoecology of the North, Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: alla-vasilch@yandex.ru

³ Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: nadin.budanceva@mail.ru

⁴ Laboratory of Geoecology of the North, Junior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: jessica.vasilchuk@gmail.com

⁵ Laboratory of Geoecology of the North, Junior Scientific Researcher; e-mail: alexandrginzburg13154@yandex.ru

The detailed isotopic plots based on $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values were analyzed for two parallel and synchronous syngenetic ice wedges (IW-17 and IW-20), exposed in the upper 20 meters of the outcrop in the Batagay Yedoma (Upper Ice Complex), Northern Yakutia. Based on the new ^{14}C accelerator mass spectrometry (AMS) datings of organic matter extracted from the ice, the ice wedge formation began no later than 42 ka BP, slowed significantly around 26 ka BP, and ceased around 11 ka BP. Very low values of the isotopic composition were observed in the studied ice wedges. The mean $\delta^{18}\text{O}$ values ranged from -31 to -36.2‰ , while the mean $\delta^2\text{H}$ values ranged from -232 to -283‰ . Comparison of the detailed isotopic curves for the two adjacent ice wedges allowed to identify sections at the same depth with similar isotopic values, as well as sections with isotope data that differed by 1–2‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and more than 10‰ for $\delta^2\text{H}$. Different isotopic signal from adjacent ice wedges at the same depth may be explained by different frequencies of frost cracking during the present stage of their growth. This is associated with reaching an optimal width, at which cracking occurs more intensively. The lower $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values for IW-20 compared to IW-17 at a specific depth probably suggest that these ice wedges belong to different polygonal systems. The primary generation ice wedge (IW-17) was more likely to crack, while the secondary generation ice wedge (IW-20) located within a primary polygonal network cracked during severe winters only. It was found that between 42 and 26 ka BP, ice wedges in the Batagay Yedoma were formed under severe winter conditions of the Late Pleistocene. The mean January air temperature during the ice wedge growth period ranged from -47 to -53°C . During the initial stages of each ice wedge growth cycle, frost cracking and their growth mainly occurred during colder winters.

Keywords: ice wedges, northern Yakutia, oxygen and hydrogen isotopes, radiocarbon age, Late Pleistocene, mean January paleotemperature

Acknowledgements. This research was financially supported by the Russian Science Foundation (grant No 23-17-00082). The authors would like to express their gratitude to Dr. Elya Zazovskaya for her help in radiocarbon analyses, and to Andrey Trishin and Elena Slyshkina, our field assistants.

REFERENCES

- Allard M., Kasper J.N. Temperature conditions for ice wedge cracking: field measurements from Salluit, northern Québec, *Permafrost, Proceedings, 7th International Conference, Yellowknife, Canada, Centre d'études nordiques, Université Laval, Collection Nordicana*, 1998, vol. 57, p. 5–11.
- Bronk Ramsey C. Bayesian analysis of radiocarbon dates, *Radiocarbon*, 2009, vol. 51(1), p. 337–360.
- Bunge A.A. [Description of the expedition to the mouth of the Lena River 1881–1884], *Trudy Russkoj Polyarnoj Stantsii v ustje Leny* [Proceedings of Russian Polar Art. at the mouth of the Lena, I, Supplement], 1895, p. 1–96. (In Russian)
- Chiasson A., Allard M. Thermal contraction crack polygons in Nunavik (northern Quebec): Distribution and development of polygonal patterned ground, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2022, vol. 33(3), p. 195–213, DOI: 10.1002/ppp.2150.
- Gagnon S., Allard M. Changes in ice-wedge activity over 25 years of climate change near Salluit, Nunavik (northern Québec, Canada), *Permafrost and Periglacial Processes*, 2020, vol. 31(1), p. 69–84, DOI: 10.1002/ppp.2030.
- Iwahana G., Uchida M., Horiuchi K. et al. Radiocarbon ages of plant remains in massive ground ice and underlying sediments of the Barrow permafrost tunnel, Alaska, *Radiocarbon*, 2024, p. 1–13, DOI: 10.1017/RDC.2024.25.
- Leffingwell E.K. Ground-ice wedges: the dominant form of ground-ice on the north coast of Alaska, *The Journal of Geology*, 1915, vol. 23(7), p. 635–654.
- Mackay J.R. Thermally induced movements in ice-wedge polygons, Western Arctic coast: a long-term study, *Géographie Physique et Quaternaire*, 2000, vol. 54(1), p. 41–68, DOI: 10.7202/004846ar.
- Meyer H., Opel T., Laepple T. et al. Long-term winter warming trend in the Siberian Arctic during the mid- to late Holocene, *Nature Geoscience*, 2015, vol. 8(2), p. 122–125, DOI: 10.1038/ngeo2349.
- Murton J.B., Opel T., Toms P. et al. A multimethod dating study of ancient permafrost, Batagay megaslump, east Siberia, *Quaternary Research*, 2022, vol. 105, p. 1–22, DOI: 10.1017/qua.2021.27.
- 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.
- Opel T., Wetterich S., Meyer H. et al. Ground-ice stable isotopes and cryostratigraphy reflect late Quaternary palaeoclimate in the Northeast Siberian Arctic (Oyogos Yar coast, Dmitry Laptev Strait), *Climate of the past*, 2017, vol. 13, p. 587–611, DOI: 10.5194/cp-13-587-2017.
- Park H., Ko N.-Y., Kim J. et al. A biogeochemical study of greenhouse gas formation from two ice complexes of Batagay megaslump, East Siberia, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2024, vol. 35, p. 437–449, DOI: 10.1002/ppp.2234.
- Podbornyi E.E. Vremja i intensivnost' obrazovaniya morozobojnyh treshhin [Time and intensity of the formation of frost-caused fissures], *Problemy kriolitologii*, 1978, no. VII, p. 132–141. (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.
- Shumsky P.A. [Ground Ices], *Osnovy geokriologii (merzlotovedeniya), chast 1, Obshchaya geokriologiya* [Fundamentals of geocryology, pt 1, General geocryology], Moscow, Publ. House of the Academy of Sciences of the USSR, 1959, p. 274–326. (In Russian)
- Shumsky P.A. [Research of fossil ices of Central Yakutia], *Issledovanie vechnoj merzloty v Yakutskoj respublike* [Study of permafrost in the Yakutiya Republic], Moscow, Publ. House of the Academy of Sciences of the USSR, 1952, no. 3, p. 142–161. (In Russian)

- Torgovkin N.V., Sivtsev D.E., Platonov I.A., Lykhota N.I. [Stable isotopes of oxygen and hydrogen in ice-wedges of Yakutia], *Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya geokriologii* [Actual problems and prospects of the development in geocryology], materialy VII Vserossijskogo nauchnogo molodezhnogo geokriologicheskogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem, Yakutsk, 2023, p. 88–91. (In Russian)
- Vasil'chuk A.C., Budantseva N.A., Surkova G.V., Chizhova Ju.N. O nadezhnosti paleotemperaturno-izotopnyh uravnenij Vasil'chuka i stanovlenii izotopnoj paleogeokriologii [On the reliability of Vasilchuk's paleotemperature-isotopic equations and the formation of isotopic paleogeocryology], *Arktika i Antarktika*, 2021, no. 2, p. 1–25, DOI: 10.7256/2453-8922.2021.2.36145. (In Russian)
- Vasil'chuk Yu.K. *Izotopno-kislorodnyj sostav podzemnyh l'dov (opyt paleogeokriologicheskikh rekonstrukcij)* [Oxygen isotope composition of ground ice (application to paleogeocryological reconstructions)], Moscow, Theoretical Problems Department, Russian Academy of Sciences and Lomonosov Moscow University Publ., 1992, vol. 1, 420 p., vol. 2, 264 p. (In Russian with English contents section)
- Vasil'chuk Yu.K., Plicht van der J., Jungner H. et. al. First direct dating of Late Pleistocene ice-wedges by AMS, *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, vol. 179(2), p. 237–242, DOI: 10.1016/S0012-821X(00)00122-9.
- Vtyurin B.I. *Podzemnye l'dy SSSR* [Ground ice of the USSR], Moscow, Nauka Publ., 1975, 214 p. (In Russian)

Received 25.11.2024

Revised 05.01.2025

Accepted 12.03.2025