

ЯНВАРСКАЯ ПАЛЕОТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА В ПЕРИОД МИС-3-2 В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЯКУТИИ, РЕКОНСТРУИРОВАННАЯ ПО ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЙ ЗАПИСИ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА СИНГЕНЕТИЧЕСКИХ ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ БАТАГАЙСКОЙ ЕДОМЫ

Ю. К. Васильчук, А. К. Васильчук, Н. А. Буданцева, Дж. Ю. Васильчук
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 8 июня 2023 г.

Для цитирования

Васильчук Ю. К., Васильчук А. К., Буданцева Н. А., Васильчук Дж. Ю. Январская палеотемпература воздуха в период МИС-3-2 в северо-восточной Якутии, реконструированная по высокоразрешающей записи изотопного состава сингенетических повторно-жильных льдов Батагайской едомы // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 4. — С. 516—528. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-4-516-528.

Изучение едомных отложений и повторно-жильных льдов в уникальном обнажении Батагайского термоцирка позволило получить данные о климатических колебаниях в регионе с самым суровым континентальным климатом. Прямое радиоуглеродное датирование сингенетических повторно-жильных льдов обеспечило возрастную привязку едомной толщи Батагай, данные по содержанию стабильных изотопов во льду продемонстрировали стабильные и весьма суровые условия зимнего сезона. Палеотемпература воздуха в Батагае в январе 47–42 и 30–25 тыс. калиброванных лет назад была стабильно низкой (около –51°C).

Ключевые слова: едома, повторно-жильный лед, Якутия, радиоуглеродный возраст, среднеянварская температура, поздний плейстоцен.

Введение

По оценкам исследователей из Института мерзлотоведения Сибирского отделения РАН, около 40% территории Якутии подвержено опасным явлениям при таянии многолетнемерзлых пород, деградация которых усиливается как из-за климатических изменений, так и в результате антропогенной деятельности. Реакция многолетнемерзлых пород во многом определяется льдистостью пород, как правило, сильнольдистые породы неустойчивы к тепловому воздействию.

При таянии многолетнемерзлых пород на поверхности высвобождаются органические вещества. Став доступными для микробного разложения, они приводят к выбросу огромного количества парниковых газов и ускоряют глобальное потепление. Например, в позднеплейстоценовых и голоценовых многолетнемерзлых отложениях в бассейне реки Колыма содержание органического вещества составляет 2%, при этом биоразлагаемые компоненты присутствуют не только на большой глубине, но и в приповерхностных горизонтах [1].

Батагайский термоцирк (67,58° с. ш., 134,77° в. д.) — одна из ярких иллюстраций результата уничтожения лесов на поверхности едомных толщ. В 60-е годы XX в. на участке склона горы Киргилях был

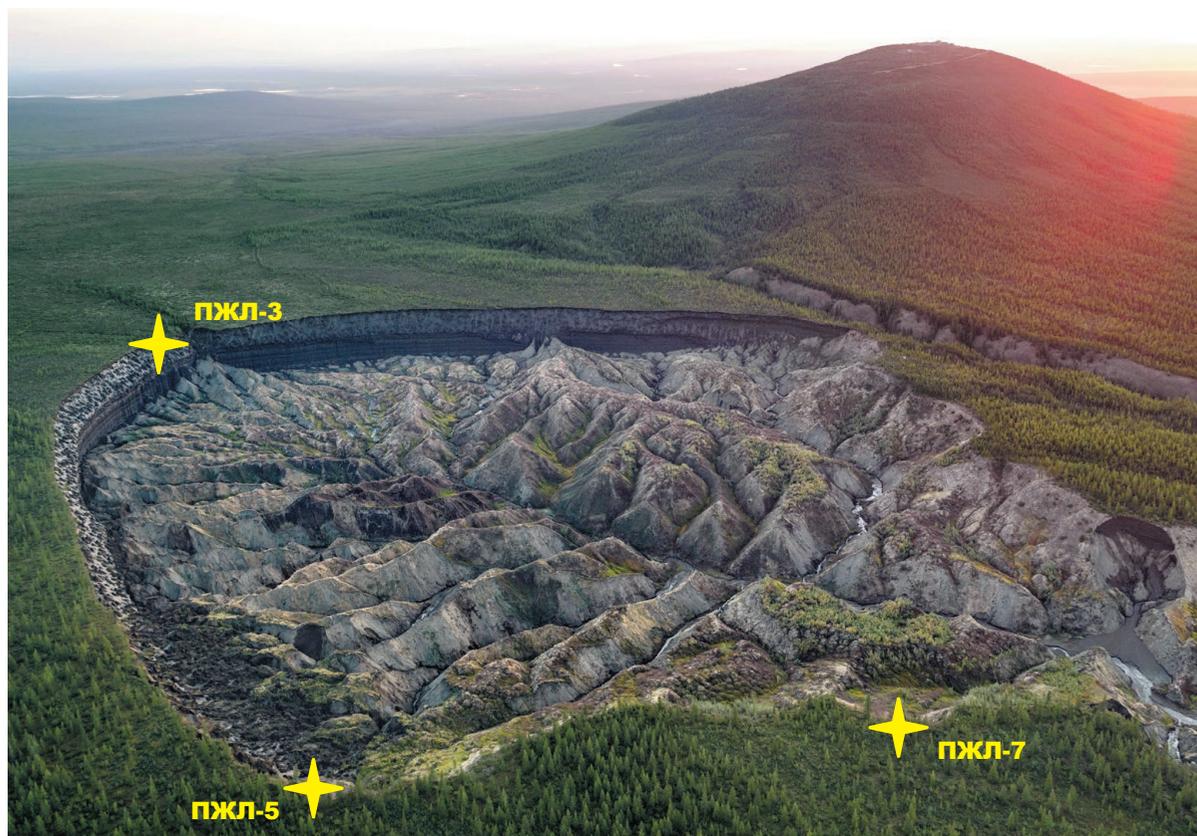


Рис. 1. Расположение изученных повторно-жильных льдов (ПЖЛ) в Батагайском термоцирке. Фото К.Орлински
Fig. 1. Location of studied ice wedges (IW) in the Batagay mega slump (thermal circus). Photo by K. Orlinsky

вырублен лес, а в настоящее время вследствие изменения термического режима сильно льдистых отложений и образования гигантского оврага сформировалось самое мощное обнажение едомной толщи в мире, его высота достигает 100 м, протяженность более 2 км в длину и около 1 км в ширину. Здесь отвесной вертикальной стенкой вскрывается едомная толща с мощными сингенетическими жилами, подстилаемая более древними горизонтально слоистыми мерзлыми отложениями с тонкими ледяными жилами. Обнажение расположено на пологом склоне, обращенном на юго-восток, у подножия горы Киргиллях, высота которой составляет 612 м (рис. 1). Западная сторона обнажения, которая выше, чем восточная, и составляет 325 м над уровнем моря, а восточная на 38 м ниже, ее высота составляет 287 м над уровнем моря.

Среднегодовая температура воздуха в районе исследований по данным метеостанции Батагай (1949—2022 гг.) варьирует от $-16,4^{\circ}\text{C}$ (1950 г.) до $-10,2^{\circ}\text{C}$ (2020 г.), наиболее низкие значения среднемесячной температуры наблюдаются в январе от $-50,9^{\circ}\text{C}$ (1982 г.) до $-37,1^{\circ}\text{C}$ (1991 г.), наиболее высокая среднемесячная температура отмечается в июле от $+8,2^{\circ}\text{C}$ (1992 г.) до $+21,9^{\circ}\text{C}$ (2001 г.) [2]. Многолетнемерзлые породы в регионе характеризуются сплошным распространением, среднегодовая

температура грунтов на глубине нулевых годовых амплитуд от $-5,5^{\circ}\text{C}$ до $-8,0^{\circ}\text{C}$. Мощность сезонно-талого слоя варьирует от 0,2 до 1,2 м.

Исследования Батагайского термоцирка показали, что за период с 1999 по 2023 гг. отмечалось постоянное увеличение его размеров. Анализ климатических параметров за последние 50 лет показал стабильную тенденцию увеличения температур (среднелетних на $1,6^{\circ}\text{C}$ и среднегодовых на $2,2^{\circ}\text{C}$) и количества атмосферных осадков (увеличение годовой суммы на 25 мм за счет летне-осеннего периода). Выявлена определенная корреляционная связь между скоростью роста Батагайского термоцирка и динамикой основных климатических показателей. Учитывая статистически выявленную взаимосвязь, а также высокую льдистость пород (40—60%) и их особую высокую льдистую структуру, Батагайский термоцирк рассматривают как индикатор глобального изменения климата [3].

В многолетнемерзлых отложениях, вскрытых в Батагайском обнажении, запасы органического углерода для верхнего двухметрового слоя (с учетом деятельного и многолетнемерзлого горизонтов) составили $26,4 \text{ кг/м}^3$, а в нижнем ледовом комплексе на глубине 60 м в слое мощностью 1 м значение $C_{\text{орг}}$ достигало $14,1 \text{ кг/м}^3$. Тысячелетиями формировавшиеся континентальные запасы углерода не утрати-

ли свой потенциал и в настоящее время являются потенциальным источником парниковых газов [4].

Это обнажение начали изучать сравнительно недавно, однако уже получено подробное описание обнажения, выделены стратиграфические единицы, возрастные пределы которых датированы методами ^{14}C , OSL, IRSL, $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$, были получены данные по содержанию стабильных изотопов, а также результаты палеоботанического и палинологического анализов [5—10].

Колебания стабильных изотопов в ледяных жилах отражают информацию о температуре воздуха и источнике влаги в холодное время года. Значения изотопно-кислородного состава ($\delta^{18}\text{O}$) в ледяных жилах широко используются в качестве показателя зимней температуры воздуха [11—14]. Целью работы являются определение возраста повторно-жильных льдов Батагайской едомы, а также характеристика колебаний палеотемпературы воздуха наиболее холодного месяца года — января — в течение формирования едомной толщи и сопоставление с современными значениями среднеянварской температуры, что представляется важным для прогноза, точнее, для оценки возможности сохранности многолетнемерзлых толщ и повторно-жильных льдов при изменении зимних климатических параметров.

Методы исследований

Полевые работы. Ледяные жилы отбирались с помощью топора и аккумуляторных дрелей BOSCH GSR 18V-EC TE и Makita BBA481KEY 18в со специально изготовленными титановыми насадками для отбора льда с шагом 0,2—0,3 м или меньше. Образцы для изотопного анализа были отобраны из ледяных жил по вертикальной и горизонтальной осям в каждой изучаемой ледяной жиле. Поскольку пробы льда отбирались при температуре выше нуля, для того чтобы исключить возможное участие современной воды и современного органического материала, попадающих на поверхность льда, перед отбором проб был удален поверхностный слой льда толщиной около 5—10 см. Объем образца составлял 10—15 см³, количество элементарных жилок в каждом образце не превышало 10. Флаконы дополнительно запечатывались пленкой, чтобы избежать испарения, и хранились при температуре 0—5°C. Каждый образец льда, использованный для радиоуглеродного анализа, для удаления поверхностного загрязнения дополнительно промывался талой водой из того же образца льда. Лед растапливался при температуре около 5°C в течение 24 ч, осадок изо льда собирали в пластиковые флаконы. Вмещающие отложения с органическим материалом отбирались для радиоуглеродного датирования только из мерзлой стенки разреза, оттаявший слой обязательно удалялся.

Радиоуглеродные измерения возраста. Предварительная обработка образцов производилась в лаборатории радиоуглеродного датирования

и электронной микроскопии Института географии РАН, AMS радиоуглеродное датирование — в Центре прикладных изотопных исследований Университета Джорджии (идентификатор лаборатории — IGAN_{AMS}-). Стандартное (конвенциональное) радиоуглеродное датирование органического вещества в отложениях едомы было проведено в Институте истории материальной культуры РАН (идентификатор лаборатории — Le). Калибровка всех полученных датировок проведена с применением программы Oxcal 4.4 на основе базы данных IntCal20 [15; 16], даты приведены в виде тысяч калиброванных лет назад (тыс. кал. лет).

Измерения стабильных изотопов. Изотопный состав кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и водорода ($\delta^2\text{H}$) во льду измерялся в режиме постоянного потока гелия (CF-IRMS) на масс-спектрометре Delta-V в изотопной лаборатории географического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (МГУ). Калибровка производилась с использованием международных стандартов VSMOW, GRESP и SLAP. Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ выражены в промилле относительно VSMOW. Погрешности измерений составили $\pm 0,6\text{‰}$ и $\pm 0,1\text{‰}$ для значений $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ соответственно. Изотопный состав ледяных жил, представленных в данной статье, определен по 171 образцу. Дейтериевый эксцесс d_{exc} рассчитан по формуле В. Дансгора [17]: $d_{\text{exc}} = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$. Значения d_{exc} в изотопных исследованиях используется как индикатор неравновесного фракционирования, в целом его вариации определяются условиями (влажность, температура, скорость ветра) в регионе, являющемся источником влаги, а также условиями выпадения осадков и изменения изотопного состава снега в течение зимнего периода и последующего таяния и заполнения морозобойных трещин (испарение, конденсация, повторное промерзание/протаивание).

Зависимость между содержанием стабильных изотопов в ледяных жилах и температурой воздуха. Чтобы установить взаимосвязь между значениями $\delta^{18}\text{O}$ в ледяной жиле и температурой воздуха, мы сравнили температуру холодного периода и январскую температуру воздуха, а также значения $\delta^{18}\text{O}$, полученные по современным жильным росткам в разных регионах криолитозоны Евразии [11; 18]. Эти зависимости выражены в упрощенном уравнении регрессии

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

где $T_{\text{ср.январь}}$ — средняя температура воздуха в январе в период образования ледяной жилы; $\delta^{18}\text{O}_{\text{пжл}}$ — изотопный состав кислорода во льду ледяной жилы.

Для исключения краевого эффекта, который приводит к увеличению значений $\delta^{18}\text{O}$ у контакта ледяной жилы с вмещающими отложениями, повторно-жильный лед для изотопного анализа отбирался не ближе 0,3 м от края жилы, а также из рассмотренных были исключены образцы со слишком низкими



Рис. 2. Батагайская едомная толща. Фото Ю. К. Васильчука, 2017 г.
Fig. 2. Batagay mega-slump, with yedoma exposure. Photo by Yu. Vasil'chuk, 2017

или слишком высокими значениями дейтериевого эксцесса, отражающие влияние изотопного фракционирования на первичный изотопный сигнал снега — основного источника воды для формирования жильного льда.

Поскольку в базовом исследовании [11] учитывались данные метеостанций с 1930 по 1966 гг., то для уточнения интерпретации зависимости изотопного состава и зимней температуры для относительно теплых и холодных зимних сезонов были проанализированы данные метеорологических наблюдений с 1930 по 2022 гг. и сопоставлены со значениями $\delta^{18}\text{O}$ в ростках ледяных жил вблизи метеостанций для ряда регионов криолитозоны России [19]. Сравнение уравнений регрессии, полученных для интервалов 1930—1990 гг. и 1930—2017 гг., позволило сделать вывод, что они количественно схожи, а поправки на более теплые и холодные зимы находятся в пределах статистической погрешности [19]. Это доказывает справедливость ранее выведенных соотношений [11] и основанных на них палеореконструкций.

Обсуждение результатов

Полученные радиоуглеродные данные позволяют верифицировать время формирования ледяных жил в верхней и нижней частях Батагайской едомы, а также датировать детальное распределение значений $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d_{exc} в трех ледяных жилах по вертикали. В данной работе авторы используют понятие едомы в трактовке Ю. К. Васильчука [18]: едома — это сингенетические сильнольdistые (содержание

льда более 50—90%), как правило, богатые органическим материалом (содержание органики более 1—2%), иловатые и пылеватые супесчаные и мелкопесчаные позднеплейстоценовые отложения с характерным запахом, содержащие мощные нередко многоярусные повторно-жильные льды (15—20 м и более высотой, 1—3,5 м шириной).

Криостратиграфия

Глубина Батагайского обнажения согласно измерениям, проведенным в разные годы, составляет от 50 до 92 м, длина и ширина — более 1 км. В центральной его части с поверхности примерно до глубины 55 м вскрывается вертикальная стена сильно льdistых отложений (рис. 2). Батагайский разрез был разделен на несколько основных стратиграфических единиц [10; 20] в соответствии с результатами датирования по ^{14}C , OSL, IRSL, $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$: верхний песок (от 15 090 до 42 390 лет назад); верхний ледовый комплекс — едомная толща (от 27 160 до 52 210 лет назад), нижний песок (более 123 200 лет), нижний ледовый комплекс (около 650 тыс. лет назад). Между верхним ледовым комплексом и нижним песком находятся линзы древесных остатков мощностью до 3 м.

В едомной толще в центральной стенке обнажения выделяются три яруса ледяных жил, верхний в интервале 315—320 м, средний в интервале 260—290 м и нижний в интервале 245—260 м.

В самом верху обнажения вскрываются узкие ледяные жилы шириной не более 1,5—2 м. Головы ледяных жил в некоторых местах залегают практи-

чески с поверхности. Разделяющие жилы грунтовые полигоны составляют около 1,5—3 м. Из верхнего яруса ледяных жил с глубины 5—10 м (315—320 м абсолютной высоты) детально опробован повторно-жильный лед — ледяная жила №3 (ПЖЛ-3). Ледяная жила № 5 (ПЖЛ-5) шириной 1,5 м мощностью 16 м расположена в южной части разреза на высоте 266—282 м над уровнем моря, ее верхние 8 м перекрыты осыпью. Ледяная жила № 7 (ПЖЛ-7) высотой более 13 м и шириной около 2 м на глубине 2,4—12,8 м (в интервале высот 239—227 м) расположена на узкой части Батагайского разреза (см. рис. 1).

Радиоуглеродный возраст ледяных жил

ПЖЛ-3. Для AMS радиоуглеродного датирования были отобраны микровключения органического ма-

териала из ледяной жилы (ПЖЛ-3) верхнего яруса полигонально-жильного комплекса Батагайской едомы. Всего получено 7 новых датировок, все они конечные (табл. 1).

Авторы предполагают, что две датировки, полученные из ПЖЛ-3, скорее всего валидные: 27 200 кал. лет (на глубине 7,6 м) и 30 886 кал. лет (на глубине 10 м) (рис. 3). Пять других датировок получены по образцам льда, в разной степени содержащим переотложенный органический материал — три радиоуглеродных даты в верхней части ПЖЛ-3 (28 748 кал. лет, 31 381 кал. лет и 27 156 кал. лет) и две в нижней части ПЖЛ-3 (34 396 кал. лет и 32 895 кал. лет). Поскольку расхождение датировок во льду ПЖЛ-3 не очень существенное, то практически все полученные результаты датирования

Таблица 1. Радиоуглеродные AMS датировки образцов органического материала из ледяных жил Батагайской едомы № 3, 5, 7

Table 1. Radiocarbon AMS dates of the organic matter samples from IW 3, 5, 7 of Batagay mega-slump

Полевой номер	Глубина, м (высота, м над уровнем моря)	Лабораторный индекс	¹⁴ C возраст, лет назад	Калиброванный ¹⁴ C возраст, лет назад *	Медианное значение возраста, кал. лет назад	δ ¹⁸ O, ‰	δ ² H, ‰
ПЖЛ-3							
YuV-17/Bat 65	5,7 (319,3)	IGAN _{AMS} -6442	24 490±70	29 107—28 441	28 748	-34,69	-265,3
YuV-17/Bat 61	6,1 (318,9)	IGAN _{AMS} -6471	27 437±80	31 722—31 131	31 381	-34,83	-266,9
YuV-17/Bat 55	6,7 (318,3)	IGAN _{AMS} -6440	22 760±60	27 308—26 451	27 156	-34,51	-269,9
YuV-17/Bat 48	7,6 (317,4)	IGAN _{AMS} -6439	22 830±60	27 340—26 477	27 200	-34,49	-270,3
YuV-17/Bat 42	8,8 (316,2)	IGAN _{AMS} -6438	29 910±110	34 705—34 055	34 396	-34,05	-266,5
YuV-17/Bat 37	9,7 (315,3)	IGAN _{AMS} -6437	28 620±150	33 750—31 981	32 895	-34,23	-264,1
YuV-17/Bat 34	10,0 (315,0)	IGAN _{AMS} -6436	26 540±80	31 110—30 375	30 886	-34,74	-269,2
ПЖЛ-5							
18-B-VV/30	12,55 (270,45)	IGAN _{AMS} -6575	41 970±350	45 750—43 970	44 724	-34,42	-264,4
18-B-VV/15	14,8 (268,2)	IGAN _{AMS} -6574	46 785±470	52 212—47 243	49 232	-34,32	-268,3
18-B-VV/1	17,0 (266,0)	IGAN _{AMS} -6573	45 235±370	49 001—46 073	47 541	-33,82	-256,0
ПЖЛ-7							
18-B-VV/80	2,4 (237,6)	IGAN _{AMS} -6577	48 940±580	50 890—47 373	52 286	-33,25	-260,1
18-B-VV/111	7,0 (233,0)	IGAN _{AMS} -6578	43 520±320	47 220—44 857	45 844	-33,98	-254,1
18-B-VV/150	12,8 (227,2)	IGAN _{AMS} -6579	45 570±630	50 840—45 929	47 901	-34,51	-258,6

* Возрастной интервал с вероятностью 95,4%.
Age range with a probability of 95,4%.

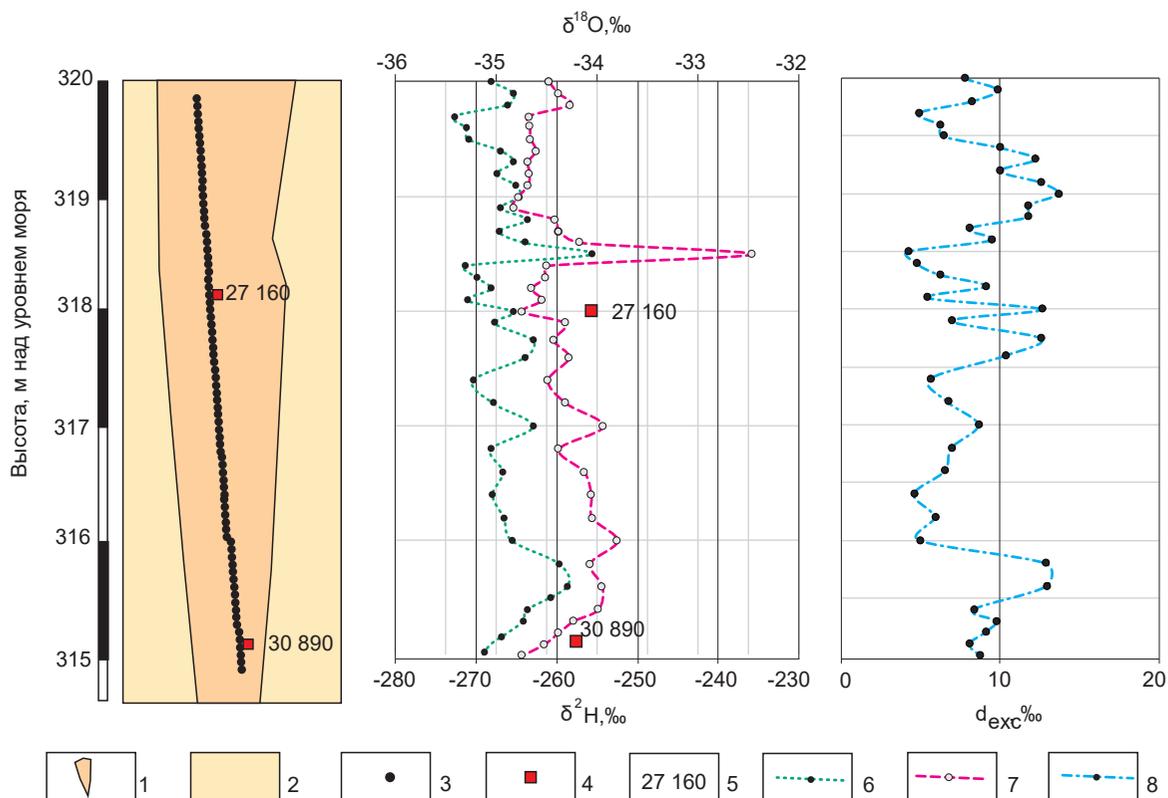


Рис. 3. Верхний фрагмент Батагайской едомной толщи с ПЖЛ-3: 1 – повторно-жильный лед, 2 – супесь серая льдистая, 3 – точка отбора ПЖЛ на изотопный анализ, 4 – точка отбора органики для радиоуглеродного датирования, 5 – возраст органики, кал. лет, 6 – значения $\delta^2\text{H}$, 7 – значения $\delta^{18}\text{O}$, 8 – значения d_{exc}

Fig. 3. The upper fragment of the Batagay yedoma with IW-3: 1 – ice wedge, 2 – gray icy sandy loam, 3 – point of sampling of IW for stable isotope analysis, 4 – point of selection of organic matter form IW for radiocarbon dating, 5 – age of organic matter, cal. years, 6 – $\delta^2\text{H}$ values, 7 – $\delta^{18}\text{O}$ values, 8 – d_{exc} values

подтверждают время сингенетического формирования фрагмента жилы ПЖЛ-3 в диапазоне от 30,8 до 27,2 тыс. кал. лет назад.

ПЖЛ-5. Для AMS радиоуглеродного датирования были отобраны микровключения органического материала из ледяной жилы (ПЖЛ-5) нижнего яруса полигонально-жильного комплекса Батагайской едомы (рис. 4). Всего получены три новых датировки, все они конечные. Авторы предполагают, что одна из датировок ($46\,785 \pm 470$ лет, т. е. 49 232 кал. лет) получена по более древнему переотложенному органическому материалу во льду.

Две другие датировки, скорее всего, валидные и составляют 44 724 кал. лет (на глубине 12,5 м) и 47 541 кал. лет (на глубине 17,0 м).

ПЖЛ-7. Для AMS радиоуглеродного датирования были отобраны микровключения органического материала из ледяной жилы (ПЖЛ-7) нижнего яруса полигонально-жильного комплекса Батагайской едомы, находящейся на расстоянии около 200 м от ПЖЛ-5. Всего получены три новых датировки (рис. 5), все они конечные. Предположительно датировка $48\,940 \pm 580$ лет, т. е. 52 286 кал. лет, получена по более древнему переотложенному органическо-

му материалу во льду. Две другие датировки, скорее всего, валидные и составляют 45 844 кал. лет (на глубине 7,0 м) и 47 901 кал. лет (на глубине 12,8 м).

Таким образом, установлено, что едомный комплекс Батагая накапливался на высотных отметках от 320 до 227 м над уровнем моря. Формирование ПЖЛ-3 относится ко времени второй морской изотопной стадии (MIS-2), а ПЖЛ-5 и ПЖЛ-7 — к третьей морской изотопной стадии (MIS-3). Согласно результатам датирования, ПЖЛ-5 (44,7—47,5 тыс. лет назад) и ПЖЛ-7 (45,8—47,9 тыс. лет назад) формировались одновременно на разных уровнях: 274—268 и 224—227 м. Учитывая положение Батагайского термоцирка на пологом склоне горы Киргиллях, по результатам датирования можно заключить, что едома Батагая имеет склоновое происхождение.

Конвенциональным методом из отложений едомы Батагайского разреза получены три ^{14}C датировки (табл. 2). На глубине 5,0 м из слабовыраженного почвенного горизонта рядом с ПЖЛ-3 получена ^{14}C датировка $19\,200 \pm 3000$ лет. Несколько ниже на глубине 5,4 м датирован органический материал из норки суслика $25\,150 \pm 3000$ лет. На глубине 11,0 м датирована кость $24\,900 \pm 500$ лет. Отметим, что да-

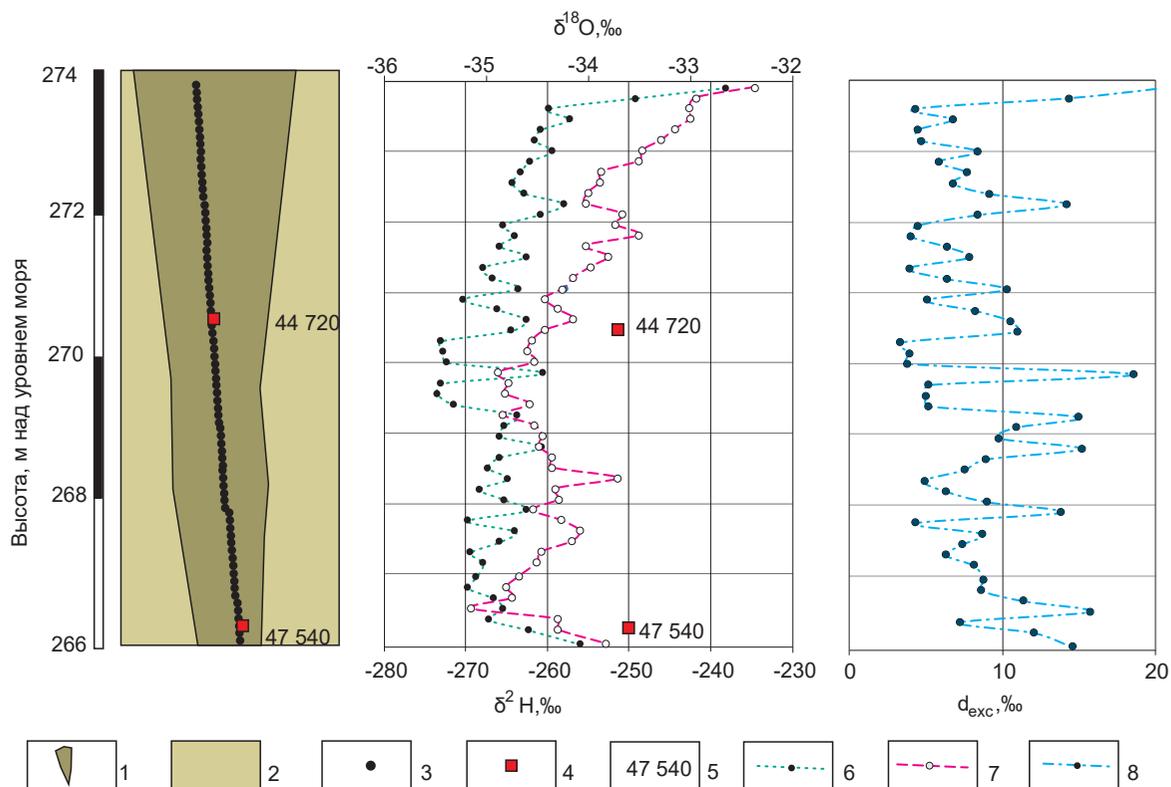


Рис. 4. Нижний фрагмент Батагайской едомной толщи с ПЖЛ-5: 1 – повторно-жильный лед, 2 – супесь серая льдистая, 3 – точка отбора ПЖЛ на изотопный анализ, 4 – точка отбора органики, 5 – возраст органики, кал. лет, 6 – значения $\delta^2\text{H}$, 7 – значения $\delta^{18}\text{O}$, 8 – значения d_{exc}
 Fig. 4. The lower fragment of the Batagay yedoma with IW-5: 1 – ice wedge, 2 – gray icy sandy loam, 3 – point of sampling of IW for stable isotope analysis, 4 – point of selection of organic matter form of IW for radiocarbon dating, 5 – age of organic matter, cal. years, 6 – $\delta^2\text{H}$ values, 7 – $\delta^{18}\text{O}$ values, 8 – d_{exc} values

тировка, полученная по органическому материалу из норки суслика, близка к ^{14}C дате $26\,180 \pm 220$ лет по остаткам *Plantago sp.*, *Artemisia sp.* в норе суслика [9] на глубине 4,5 м в северо-западной части разреза. Полученные датировки не противоречат датировкам органического материала из повторно-жильных льдов.

Содержание стабильных изотопов в повторно-жильных льдах

ПЖЛ-3. Изотопный состав ПЖЛ весьма отрицательный и достаточно однородный за исключением одного заметного положительного сдвига на отметке 318,5 м (см. рис. 3), тренда не прослеживается. Значения $\delta^{18}\text{O}$ изменяются от $-34,83$ до $-32,47$ ‰,

Таблица 2. Конвенциональные радиоуглеродные датировки из отложений едомы в Батагайском разрезе
 Table 2. Conventional radiocarbon dates in the sediments surrounding IW-3 of Batagay yedoma

Полевой номер	Глубина, м	Лабораторный индекс	^{14}C возраст, лет назад	Калиброванный ^{14}C возраст, кал. лет назад	Медианное значение возраста, кал. лет назад
YuV-17-Bat/101, погребенная почва	5,0	Le-11724	$19\,200 \pm 3000$	43 080—16 990	24 870
B-VV/2019-60, норка суслика	5,4	Le-12132	$25\,150 \pm 3000$	45 850—23 956	31 170
YuV-17-Bat/120, кость <i>in situ</i>	11,0	Le-11725	$24\,900 \pm 500$	30 136—27 970	29 180

* Возрастной интервал с вероятностью 95,4%.
 Age range with a probability of 95,4%.

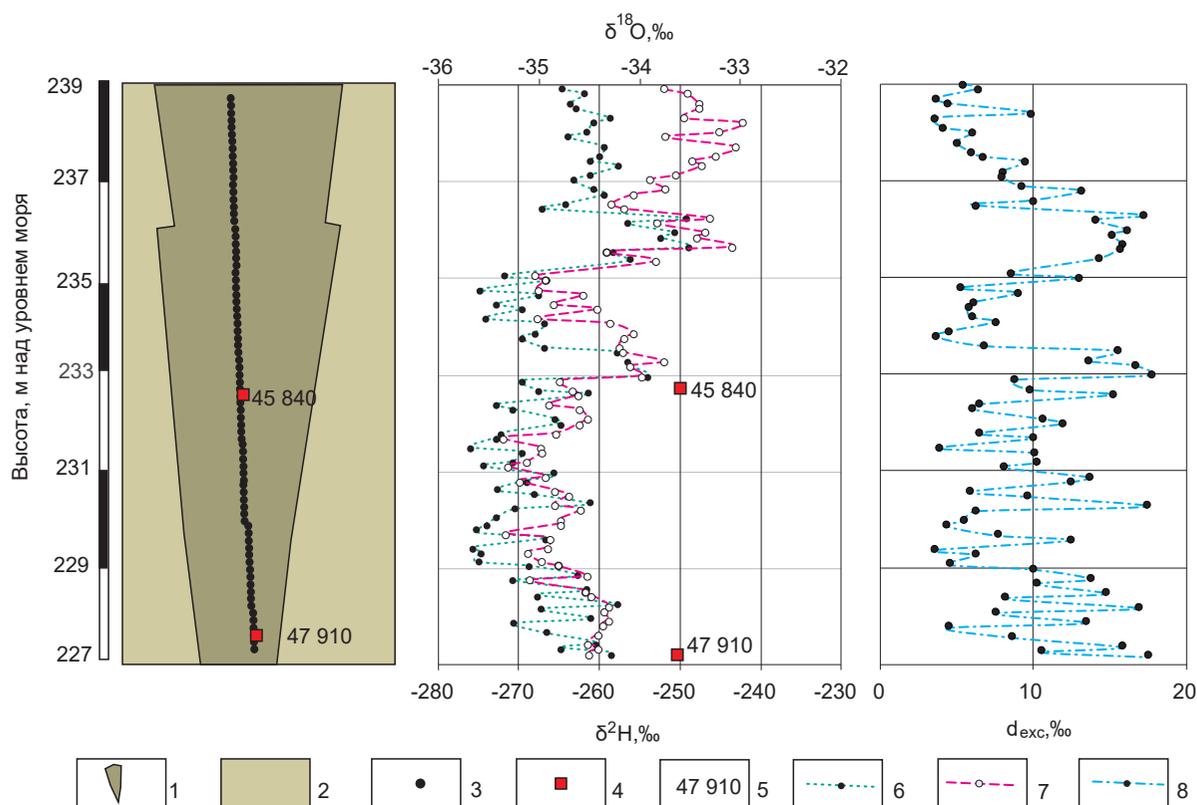


Рис. 5. Нижний фрагмент Батагайской едомной толщи с ПЖЛ-7: 1 – повторно-жильный лед, 2 – супесь серая льдистая, 3 – точка отбора ПЖЛ на изотопный анализ, 4 – точка отбора органики, 5 – возраст органики, кал. лет, 6 – значения $\delta^2\text{H}$, 7 – значения $\delta^{18}\text{O}$, 8 – значения d_{exc}

Fig. 5. The lower fragment of the Batagay yedoma with IW-7: 1 – ice wedge, 2 – gray icy sandy loam, 3 – point of sampling of IW for stable isotope analysis, 4 – point of selection of organic matter from IW for radiocarbon dating, 5 – age of organic matter, cal. years, 6 – $\delta^2\text{H}$ values, 7 – $\delta^{18}\text{O}$ values, 8 – d_{exc} values

составляя в среднем $-34,23\text{‰}$, значения $\delta^2\text{H}$ варьируют от $-272,6$ до $-261,8\text{‰}$, в среднем составляя $-266,8\text{‰}$, величина дейтериевого эксцесса $4,16$ — $13,64\text{‰}$, в среднем $8,56\text{‰}$ (данные получены по 39 образцам). Уравнение соотношения $\delta^2\text{H}$ — $\delta^{18}\text{O}$ для ПЖЛ-3 имеет вид $\delta^2\text{H} = 5,77\delta^{18}\text{O} - 68,09$ ($R^2 = 0,45$).

ПЖЛ-5. Изотопный состав ледяной жилы IW-5 также весьма отрицательный, вариации значений в этой ледяной жиле более заметны по сравнению с ПЖЛ-3, до абсолютной отметки $270,5$ м изотопный тренд не прослеживается. В интервале $270,6$ — $273,6$ м отмечается постепенное повышение значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, что, возможно, указывает на изменение условий зимнего сезона. Величина $\delta^{18}\text{O}$ варьирует от $-35,15$ до $-32,36\text{‰}$, в среднем составляет $-34,12\text{‰}$, значения $\delta^2\text{H}$ варьируют от $-273,5$ до $-238,1\text{‰}$, в среднем составляя $-264,5\text{‰}$, величина дейтериевого эксцесса варьирует от $3,30$ до $20,78\text{‰}$, среднее значение $8,61\text{‰}$ (данные получены по 53 образцам). Уравнение регрессии $\delta^2\text{H} = 7,67\delta^{18}\text{O} - 2,84$ ($R^2 = 0,54$) соответствует линии, близкой к глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ).

ПЖЛ-7. Изотопный состав ледяной жилы IW-7 также весьма отрицательный. В интервале абсолютных высотных отметок $227,2$ — $233,2$ м изотоп-

ные значения стабильно низкие, выше, в интервале $233,4$ — 239 м, прослеживается некоторое утяжеление изотопного состава, которое выражено не так заметно, как в ПЖЛ-5. Величина $\delta^{18}\text{O}$ изменяется от $-35,36$ до $-32,98\text{‰}$, среднее значение $-34,33\text{‰}$, величины $\delta^2\text{H}$ варьируют от $-276,0$ до $-248,9\text{‰}$, среднее значение $-265,2\text{‰}$, величина дейтериевого эксцесса $3,54$ — $17,74\text{‰}$, среднее значение $9,48\text{‰}$ (данные получены по 79 образцам). Уравнение регрессии $\delta^2\text{H} = 8,21\delta^{18}\text{O} - 16,59$ ($R^2 = 0,59$) соответствует линии, близкой к ГЛМВ.

Датирование отложений Батагайского разреза

История формирования отложений, вскрытых Батагайским термоцирком, рассмотрена Дж. Мёртоном с соавторами [5; 20]. Они полагают, что многолетнемерзлые породы развивались сингенетически при формировании песчано-супесчаных отложений с параллельным образованием в них многочисленных сингенетических ледяных жил. В результате сформировались два ледовых комплекса и несколько горизонтов палеопочв. Остатки древесины из верхней древесной линзы ориентировочно относятся к интерстадиальным условиям во время МИС-3 (57 — 29 тыс. лет назад),

Научные исследования в Арктике

в свою очередь, нижняя древесная линза указывает на межледниковые условия во время МИС-5 (130—71 тыс. лет назад). Песчаные отложения и палеопочвы между лесными пластами накопились во время МИС-4 (71—57 тыс. лет назад) [5]. Синтез датировок четырех методов датирования, выполненный Дж. Мёртоном с соавторами [20], позволил оценить вероятный возраст нижнего ледового комплекса, верхнего ледового комплекса (едомы) и верхней песчаной пачки. Из отложения нижнего ледового комплекса получено две pIRIR (люминесценция в инфракрасном цвете) датировки: 658 ± 74 тыс. лет и 693 ± 97 тыс. лет, датировка, полученная по $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ из ледяной жилы нижнего ледового комплекса, составила 624 ± 51 тыс. лет. Эти результаты позволили предположить, что нижний ледовый комплекс накопился в начале среднего плейстоцена или несколько ранее, вероятно, возраст нижнего ледового комплекса составляет около 650 тыс. лет [20]. На основе изучения липидных биомаркеров (алканы, жирные кислоты и спирты) [21] установлено, что органическое вещество в едоме сохранилось лучше и оно более высокого качества, чем в других стратиграфически выделенных свитах. Несмотря на то, что органика в едоме в Батагайском разрезе составляет лишь 25% общего пула органического вещества, едомные отложения обладают высоким потенциалом разложения органического вещества. Именно быстрое разложение легко разлагаемого органического вещества потенциально может привести к значительным выбросам парниковых газов.

По повторно-жильным льдам получены детальные изотопно-кислородные и дейтериевые диаграммы [7], позволившие судить о весьма суровых зимних условиях, существовавших в Верхоянском районе Северо-Восточной Якутии в позднем плейстоцене. Однако хронологическая привязка этих диаграмм была выполнена на основе датирования вмещающих отложений, а вследствие того, что в едомных толщах обычно отмечается существенное переотложение органического материала, заметно удрежняющего радиоуглеродные датировки [7], то и среди датировок, полученных по макровключениям органики из Батагайского разреза, встречен ряд инверсий радиоуглеродных дат [5; 9].

На основании стратегии выбора наиболее молодой радиоуглеродной датировки с одной и той же глубины как более достоверной [6] установлено, что верхние 20 м едомной толщи формировались примерно в период от 36 до 26—12 тыс. лет назад. Это вполне соответствует радиоуглеродным датировкам, которые были получены Дж. Мёртоном [5], К. Ашатиной с соавторами [9], а также Т. Опелем с соавторами [10].

Данные по содержанию изотопов кислорода и водорода в изученных повторно-жильных льдах, близки к данным, полученным Т. Опелем с соавторами [10] из ледяной жилы, из которой получе-

на ^{14}C дата по не идентифицированным остаткам растений $24\ 858 \pm 536$ лет, т. е. близкое значение к датировкам ПЖЛ-3. Здесь по 12 образцам получены следующие средние значения: $-34,9\text{‰}$ для $\delta^{18}\text{O}$, $-269,4\text{‰}$ для $\delta^2\text{H}$ и $11,0\text{‰}$ для d_{exc} , что близко к данным по ПЖЛ-3, где изучено 39 образцов льда: $-34,23\text{‰}$, $-266,29\text{‰}$ и $8,56\text{‰}$ соответственно для значений $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d_{exc} .

Палеореконструкция среднеянварской температуры воздуха

На основе подробных изотопных данных была рассчитана средняя температура января позднего плейстоцена от 25 до 30 тыс. кал. лет и от 42 до 47 тыс. кал. лет для разреза Батагай и сопоставлена с реконструированными палеотемпературами января ряда других разрезов Якутии (табл. 3).

Установлено, что самая низкая средняя температура воздуха января в этот период была именно в районе Батагай (-51°C), в то время как в более северных районах (500—600 км севернее), она была на $4\text{—}5^\circ\text{C}$ выше 30—25 тыс. кал. лет назад и на $5\text{—}7^\circ\text{C}$ выше 47—42 тыс. кал. лет назад. Эти суровые зимние климатические условия объясняются стабильным существованием якутского антициклона в позднем плейстоцене (от 48 до 25 тыс. кал. лет назад), который существует и в настоящее время [7; 10; 18]. Так, 9 января 2023 г. в Батагае была зафиксирована температура воздуха $-53,8^\circ\text{C}$, а севернее, в Усть Куйге ($70,00^\circ$ с. ш. $135,60^\circ$ в. д.) -46°C [2].

Даже весьма подробное опробование ледяных жил в разрезе Батагай не позволило обнаружить экстремальное похолодание последнего ледникового минимума (МИС-2), которое было зафиксировано в изотопной записи повторно-жильного льда на острове Большой Ляховский [28]. Основываясь на наших реконструкциях, можно предположить, что среднеянварская температура в период экстремального похолодания на острове Большой Ляховский составляла $-55,5^\circ\text{C}$. Это можно объяснить как региональными климатическими особенностями, так и тем фактом, что изученные нами повторно-жильные льды не накапливались во время ледникового минимума. Как показали Т. Портер и Т. Опель [13], изотопные данные, отражающие чрезвычайно холодные зимние условия, редки в Арктике. В Батагае самые низкие значения $\delta^{18}\text{O}$, составляющие около -37‰ , были получены на глубине 50 м в ледяной жиле ПЖЛ-2 [28]. То есть свидетельства экстремального зимнего похолодания, обнаруженные в ледяных жилах Батагай, по-видимому, относятся к четвертой изотопной стадии (МИС-4).

Выводы

1. Повторно-жильные льды Батагайской едомы формировались в период МИС-3, от 48 до 43 тыс. кал. лет назад (нижний ярус) и в период МИС-2, от 37 до 24 тыс. кал. лет назад (верхний ярус).

Таблица 3. Среднеянварская температура воздуха $T_{\text{ср.январь}}$ для периодов 25—30 и 42—47 тыс. кал. лет назад в Якутии, реконструированная на основе средних значений $\delta^{18}\text{O}$ в повторно-жильных льдах ($\delta^{18}\text{O}_{\text{ПЖЛ}}$) с использованием уравнения (1), и современные значения $T_{\text{ср.январь}}$ по данным ближайших метеостанций

Table 3. Mean January air temperature (T_{mj}) for the periods 25—30 and 42—47 thousand cal. years in Yakutia, reconstructed on the basis of the mean $\delta^{18}\text{O}$ values for ice wedges ($\delta^{18}\text{O}_{\text{IW}}$) using equation (1) and the current values of T_{mj} according to the nearest weather stations

Район исследований, координаты, авторы	$\delta^{18}\text{O}_{\text{ПЖЛ}}$, ‰		$T_{\text{ср.январь}}$, °C	
	Древние ПЖЛ	Современные ПЖЛ	Реконструированная	Современная
<i>25—30 тыс. кал. лет назад</i>				
Батагай, 67,58° с. ш., 134,77° в. д. [7]	–34	–29	–51	–45
Мыс Мамонтов Клык, 73°36' с. ш., 117°11' в. д. [22]	–30	–21,3	–45	–33
Мамонтова Хайота, 71°61' с. ш., 129°28' в. д. [23]	–31	–23	–46	–33
Буор-Хая, 72°20' с. ш., 126°17' в. д. [24]	–31	–23	–45	–34
Кулар, 70°38' с. ш., 131°53' в. д. [25]	–32	–26	–47	–37
<i>42—47 тыс. кал. лет назад</i>				
Батагай, 67,58° с. ш., 134,77° в. д. [8]	–34	–29	–51	–45
Ойгосский Яр, 72,7° с. ш., 143°30' в. д. [26]	–29,5	–24,4	–44	–30,4
Мамонтова Хайота, 71°61' с. ш., 129°28' в. д. [23]	–30,2	–23	–45	–31
Остров Курунгах-Сисе, 72°20' с. ш., 126°18' в. д. [27]	–31,8	–24,6	–48	–34,3
Кулар, 70°38' с. ш., 131°53' в. д. [25]	–31	–25	–46	–36

2. Ледяные жилы, формировавшиеся в течение МИС-3, располагаются на разных абсолютных высотах: одна на высоте 239—227 м над уровнем моря, вторая — на высоте 274—266 м над уровнем моря, при этом по ним получены очень близкие радиоуглеродные датировки, что является хорошим показателем склонового генезиса отложений Батагайской едомы.

3. Диапазон изотопных значений в повторно-жильных льдах обоих ярусов достаточно узкий: в ледяных жилах, формировавшихся в период МИС-3, вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ составили 3‰ (от –35,36 до –32,36‰), величин $\delta^2\text{H}$ — 38‰ (от –276,0 до –238,1‰); в ледяных жилах, формировавшихся в период МИС-2, вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ не превышали 2,5‰ (от –34,83 до –32,47‰), величин $\delta^2\text{H}$ — 17‰ (от –272,60 до –255,60‰).

4. Среднеянварская палеотемпература воздуха в северо-восточной Якутии в районе Батагай в периоды МИС-3 и МИС-2 составляла около –51°C, при этом даже в более северных районах,

где ледяные жилы также активно росли в течение стадий МИС-3 и МИС-2 (Кулар, мыс Мамонтов Клык, острова Курунгах-Сисе и Буор-Хая), она, как правило, была выше и составляла около –44...–48°C.

Финансирование

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

Благодарность

Авторы выражают признательность А. Ю. Тришину и А. П. Гинзбургу за помощь в полевых работах, а также Э. П. Зазовской и Г. И. Зайцевой за помощь в проведении радиоуглеродных определений.

Литература/References

1. Zhrebker A., Podgorski D. C., Kholodov V. et al. The molecular composition of humic substances isolated from yedoma permafrost and alas cores in the eastern Siberian Arctic as measured by ultrahigh resolution

- mass spectrometry. *J. of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, vol. 124, pp. 2432—2445. Available at: <https://doi.org/10.1029/2018JG004743>.
2. Справочно-информационный портал «Погода и климат». — URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/24263.htm>.
Reference and information portal “Weather and climate”. Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/24263.htm>. (In Russian).
3. Алиев Р. Г., Медведков А. А. Анализ климатогенной динамики Батагайского термоденудационного «кратера» с использованием данных дистанционного зондирования // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС». — 2020. — Т. 26, Ч. 2. — С. 366—375. — DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-366-375.
Aliev R. G., Medvedkov A. A. Analysis of the climatogenic dynamics of the Batagay thermodenudation “crater” using remote sensing data. Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii “InterCarto. InterGIS”. [Materials of the International Conference “InterCarto. InterGIS”], 2020, vol. 26, pt. 2, pp. 366—375. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-366-375. (In Russian).
4. Шепелев А. Г., Черепанова А. М. Мерзлотные ландшафты Верхоянского района на примере Батагайского провала и Кисилыхской гряды (Северная Якутия) // *Соврем. проблемы террит. развития: Электрон. журн.* — 2019. — № 3.
Shepelev A. G., Cherepanova A. M. Permafrost landscapes of the Verkhoyansk Region in the case study of the Batagay laydown and the Kisilakh ridge (Northern Yakutia). Sovremennyye problemy territorial'nogo razvitiya: elektronnyi zhurnal. [Modern problems of territorial development: Electron journal], 2019, no. 3. (In Russian).
5. Murton J. B., Edwards M. E., Lozhkin A. V. et al. Preliminary paleoenvironmental analysis of permafrost deposits at Batagaika megaslump, Yana Uplands, northeast Siberia. *Quaternary Research*, 2017, no. 87, pp. 314—330. DOI: 10.1017/qua.2016.15.
6. Vasil'chuk Yu. K., Vasil'chuk A. C. Validity of radiocarbon ages of Siberian yedoma. *GeoRes J.*, 2017, no. 13, pp. 83—95. DOI: 10.1016/j.grj.2017.02.004.
7. Vasil'chuk Yu. K., Vasil'chuk J. Y., Budantseva N. A., Vasil'chuk A. C., Trishin A. Y. High-Resolution Oxygen Isotope and Deuterium Diagrams for Ice Wedges of the Batagay Yedoma, Northern Central Yakutia. *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 487, no. 2, pp. 975—978. DOI: 10.1134/S1028334X19080312.
8. Vasil'chuk Yu. K., Vasil'chuk J. Y., Budantseva N. A., Vasil'chuk A. C. New AMS dates of organic microinclusions in ice wedges of the lower part of the Batagay Yedoma, Yakutia. *Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 490, pp. 100—103. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1028334X20020154>.
9. Ashastina K., Schirmeister L., Fuchs M., Kienast F. Palaeoclimate characteristics in interior Siberia of MIS 6–2: first insights from the Batagay permafrost mega-thaw slump in the Yana Highlands. *Climate of the Past*, 2017, no. 13, pp. 795—818. DOI: 10.5194/cp-13-795-2017.
10. Opel T., Murton J. B., Wetterich S. et al. Past climate and continentality inferred from ice wedges at Batagay megaslump in the Northern Hemisphere's most continental region, Yana Highlands, interior Yakutia. *Climate of the Past*, 2019, no. 15, pp. 1443—1461. DOI: 10.5194/cp-15-1443-2019.
11. Vasil'chuk Yu. 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, no. 6, pp. 640—647.
12. Opel T., Meyer H., Wetterich S., Laepple T., Murton J. Ice wedges as archives of winter palaeoclimate: a review. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2018, no. 29, pp. 199—209. Available at: <https://doi.org/10.1002/ppp.1980>.
13. Porter T. J., Opel T. Recent advances in paleoclimatological studies of Arctic wedge- and pore-ice-water isotope records. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2020, no. 31, pp. 429—441. Available at: <https://doi.org/10.1002/ppp.2052>.
14. Campbell-Heaton K., Lacelle D., Fisher D. Ice wedges as winter temperature proxy: Principles, limitations and noise in the δ 18O records (an example from high Arctic Canada). *Quaternary Science Reviews*, 2021, vol. 269, p. 107135. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.107135>.
15. Bronk Ramsey C. OxCal version 4.4.4. Available at: <https://c14.arch.ox.ac.uk>.
16. Reimer P. J., Austin W. E. N., Bard E. et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal ka BP). *Radiocarbon*, 2020, vol. 62, no. 4, pp. 725—757. DOI: 10.1017/RDC.2020.41.
17. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, no. 16, pp. 436—468. DOI: 10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x.
18. Васильчук Ю. К. Изотопно-кислородный состав повторно-жильных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций): В 2 т. / Отдел теор. проблем РАН, МГУ, ПНИИИС. — М., 1992. — Т. 1. — 420 с.; Т. 2. — 264 с.
Vasil'chuk Yu. K. Oxygen isotope composition of ground ice (application to paleogeocryological reconstructions). Theoretical Problems Department, Russian Academy of Sciences and Lomonosov Moscow University Publications. Moscow, 1992. Vol. 1. 420 p.; vol. 2. 264 p. (In Russian with English contents section).
19. Vasil'chuk Yu. 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, no. 45, pp. 791—796. DOI: 10.3103/S1068373920110060.
20. Murton J. B., Opel T., Toms P. et al. A multimethod dating study of ancient permafrost, Batagay megaslump, east Siberia. *Quaternary Research*, 2021, vol. 105, pp. 1—22. DOI: 10.1017/qua.2021.27.

21. Jongejans L. L., Mangelsdorf K., Karger C. et al. Molecular biomarkers in Batagay megaslump permafrost deposits reveal clear differences in organic matter preservation between glacial and interglacial period. *The Cryosphere*, 2022, vol. 16, pp. 3601—3617. DOI: 10.5194/tc-16-3601-2022.
22. Schirrneister L., Grosse G., Kunitsky V. et al. Periglacial landscape evolution and environmental changes of Arctic lowland areas for the last 60 000 years (western Laptev Sea coast, Cape Mamontov Klyk). *Polar Research*, 2008, no. 27, pp. 249—272. DOI: 10.1111/j.1751-8369.2008.00067.x.
23. Meyer H., Derevyagin A. Y., Siegert C., Hubberten H.-W. Paleoclimate studies on Bykovsky Peninsula, North Siberia — hydrogen and oxygen isotopes in ground ice. *Polarforschung*, 2002, no. 70, pp. 37—51.
24. Schirrneister L., Grosse G., Schwamborn G. et al. Late Quaternary history of the accumulation plain north of the Chekanovsky Ridge (Lena Delta, Russia): a multidisciplinary approach. *Polar Geography*, 2003, vol. 27, no. 4, pp. 277—319. DOI: 10.1080/789610225.
25. Vasil'chuk Yu. K., Vasil'chuk A. C. Isotope-Geochemical composition of the ice wedges in the slope yedoma on the Kular Ridge and reconstruction of the mean January air paleotemperature during 47,000-25,000 BP. *Earth's Cryosphere*, 2020, vol. 3, no. XXIV, pp. 22—33. DOI: 10.21782/EC2541-9994-2020-3(22-33).
26. 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, no. 13, pp. 587—611. Available at: <https://doi.org/10.5194/cp-13-587-2017>.
27. Wetterich S., Kuzmina S., Andreev A. et al. Palaeoenvironmental dynamics inferred from late Quaternary permafrost deposits on Kurungnakh Island, Lena Delta, Northeast Siberia, Russia. *Quaternary Science Reviews*, 2008, vol. 27, no. 15, pp. 1523—1540. DOI: 10.1016/j.quascirev.2008.04.007.
28. Васильчук Ю. К., Васильчук Д. Ю., Буданцева Н. А. и др. Изотопно-геохимические особенности Батагайской едомы (предварительные результаты) // Арктика и Антарктика. — 2017. — № 3. — С. 69—98. — DOI: 10.7256/2453-8922.2017.3.24433.
- Vasil'chuk Yu. K., Vasil'chuk J. Y., Budantseva N. A., Vasil'chuk A. C., Trishin A. Yu. Isotopic and geochemical features of the Batagaika yedoma (preliminary results). *Arktika i Antarktika [Arctic and Antarctic]*, 2017, no. 3, pp. 69—98. DOI: 10.7256/2453-8922.2017.3.24433. (In Russian).

Информация об авторах

Васильчук Юрий Кириллович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, географический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), e-mail: vasilch_geo@mail.ru.

Васильчук Алла Константиновна, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория геоэкологии Севера, географический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), e-mail: alla-vasilch@yandex.ru.

Буданцева Надежда Аркадьевна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, географический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), e-mail: nadin.budanceva@mail.ru.

Васильчук Джессика Юрьевна, младший научный сотрудник, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, географический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), e-mail: jessica.vasilchuk@gmail.com.

JANUARY AIR PALAEOTEMPERATURE DURING MIS-3-2 IN NORTH-EASTERN YAKUTIA, RECONSTRUCTED FROM A HIGH-RESOLUTION RECORD OF THE ISOTOPIC COMPOSITION OF SYNGENETIC ICE WEDGES OF THE BATAGAY YEDOMA

Vasil'chuk, Yu. K., Vasil'chuk, A. C., Budantseva, N. A., Vasil'chuk, J. Yu.

Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation)

For citing

Vasil'chuk Yu. K., Vasil'chuk A. C., Budantseva N. A., Vasil'chuk J. Yu. January air palaeotemperature during MIS-3-2 in North-Eastern Yakutia, reconstructed from a high-resolution record of the isotopic composition of syngenetic ice wedges of the Batagay Yedoma. *Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 4, pp. 516—528. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-4-516-528. (In Russian).

The article was received on June 8, 2023

Abstract

The work is aimed at determining the age of ice wedges, as well as at characterizing winter temperature fluctuations during the formation of the Yedoma based on the isotopic composition of ice wedges in the unique outcrop of the Batagay mega-slump. The researchers carried out a detailed sampling from the Upper Ice Wedge Complex of the Batagay Yedoma, determined the isotopic composition in three ice wedges at different altitudes. The results of radiocarbon dating of organic matter from ice wedge confirm the time of syngenetic formation of the upper-tier ice wedges in the range from 27.2 to 30.8 thousand cal. years. Ice wedges of the lower tier, according to the results of radiocarbon dating of ice accumulated 44.7—47.9 thousand years ago simultaneously at different levels: 274—268 m and 224—227 respectively. The study of yedoma deposits and ice-wedge ice made it possible to obtain data on climatic fluctuations in a region with the most severe continental climate. Direct radiocarbon dating of syngenetic ice wedges provided dating of ice growth in the Batagay yedoma, data on the content of stable isotopes in the ice demonstrated stable and very harsh conditions of the winter season. The air paleotemperature in Batagay in January 47—42 and 30—25 thousand cal. years ago was consistently low about -51°C .

Keywords: *yedoma, ice wedges, Yakutia, radiocarbon age, mean January paleotemperature, Late Pleistocene.*

Funding

The research was supported by Russian Scientific Foundation (Grant No. 23-17-00082).

Acknowledgements

The authors are grateful to A. Trishin and A. Ginzburg — our field assistants, also to Dr. E. Zazovskaya and Dr. H. Zaitseva for their help in radiocarbon analyses.

Information about the authors

Vasil'chuk, Yuriy Kirillovich, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Department of Landscape Geochemistry and Soil Science, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (GSP-1, Leninskie Gory, 1, Moscow, Russia, 119991), e-mail: vasilch_geo@mail.ru.

Vasil'chuk, Alla Constantinovna, Doctor of Geography, Leading Scientific Researcher of Laboratory of Geocology of the North, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (GSP-1, Leninskie Gory, 1, Moscow, Russia, 119991).

Budantseva, Nadine Arkad'evna, PhD of Geography, Senior Scientific Researcher, Department of Landscape Geochemistry and Soil Science, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (GSP-1, Leninskie Gory, 1, Moscow, Russia, 119991).

Vasil'chuk, Jessica Yur'evna, Junior Scientific Researcher, Department of Landscape Geochemistry and Soil Science, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (GSP-1, Leninskie Gory, 1, Moscow, Russia, 119991).

© Vasil'chuk Yu. K., Vasil'chuk A. C., Budantseva N. A., Vasil'chuk J. Yu., 2023