

СРЕДНЕЯНВАРСКАЯ ПАЛЕОТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА В ПЕРИОД ФОРМИРОВАНИЯ СЕЯХИНСКОЙ ЕДОМЫ 30—13 ТЫС. КАЛИБРОВАННЫХ ЛЕТ НАЗАД

Ю. К. Васильчук, Н. А. Буданцева, А. К. Васильчук

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 16 января 2024 г.

Для цитирования

Васильчук Ю. К., Буданцева Н. А., Васильчук А. К. Среднеянварская палеотемпература воздуха в период формирования Сеяхинской едомы 30—13 тыс. калиброванных лет назад // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 2. — С. 164—176. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-164-176.

Исследование едомной толщи с мощными сингенетическими повторно-жильными льдами на восточном побережье полуострова Ямал в устье реки Сеяха, включающее радиоуглеродное датирование вмещающих отложений и жильного льда, а также определение изотопного состава льда, показало, что между 30 и 13 тыс. калиброванных лет назад среднеянварская температура воздуха была в среднем на 10°С ниже современной и варьировала от –35° до –33°С. Формирование едомных толщ на севере Западной Сибири доказывает отсутствие здесь ледникового покрова во время последнего ледникового максимума.

Ключевые слова: повторно-жильные льды, едома, поздний плейстоцен, север Западной Сибири, радиоуглеродный возраст, стабильные изотопы, среднеянварская палеотемпература.

Введение

Сильнольдистые грунты, содержащие крупные повторно-жильные льды на полуострове Ямал, подвергаются термоэрозии даже в условиях стабильного климата. Техногенные воздействия усиливают интенсивность криогенных процессов. В частности, на месторождении Бованенково, где подземные льды (пластовые и повторно-жильные) широко развиты, зафиксирован семикратный рост оврагов в результате использования территории для проезда транспорта. Seriously, в десятки раз, увеличился риск криогенных оползней, что также способствовало росту оврагов. Образование отрицательных форм рельефа на участках с подземными льдами происходит как в виде стока талой воды, так и в результате тепловой осадки, на которую приходится 45% объема отрицательной формы рельефа [1].

Территория поселка Сеяха (70,16° с. ш., 72,57° в. д.), расположенного на поверхности третьей морской террасы между устьем реки Сеяха (Зеленая) и Обской губой на восточном побережье полуострова Ямал, до начала строительства была покрыта полигональной сетью с выпуклыми полигонами, образованной повторно-жильными льдами (рис. 1а). В конце 1970-х годов его территория была практически вся покрыта такими буграми, и передвигаться можно было только по деревянным корабам, защищавшим водовод. В настоящее время эти бугры засыпали песком, в пределах поселка проложили асфальтовую дорогу и построили капитальные дома, бугры формируются только на окраине поселка (рис. 1б) и окружающих его торфяниках (см. рис. 1а). Тем не менее и сейчас термоэрозия по повторно-жильным льдам приводит к появлению промоин на территории поселка, а в береговой зоне Сеяхи вытравливание повторно-жильных льдов может приводить

к обрушению береговых отложений и разрушению сооружений, теплотрасс, дорог и водоводов.

Многолетнемерзлые породы полуострова Ямал содержат скопления газа, прорыв которых может произойти на многих потенциально опасных сильнольдистых грунтах и привести к чрезвычайно опасным природным, техногенным и экологическим ситуациям. На Ямале найдено более 10 кратеров, образовавшихся в результате выбросов газа. Первый из известных кратеров обнаружен в 2014 г. в 30 км от Бованенковского месторождения, диаметр кратера по брустверу 40 м, глубина более 50 м. 28 июня 2017 г. произошел выброс газа в 34 км от поселка Сеяха в русле реки Мордыяха. Один из последних кратеров был обнаружен в 2020 г. также в районе Бованенковского месторождения [2]. Как правило, такие кратеры в течение одного-двух лет заполняются водой, образуя озера округлой или неправильной формы. Первый ямальский кратер сейчас также полностью заполнен водой. Исследователи полагают, что некоторые ямальские озера имеют именно такую природу. Кроме того, в процессе исследований В. И. Богоявленского было выделено более 1600 термокарстовых озер, дно которых усеяно кратерами [3, с. 14]. По данным Института проблем нефти и газа РАН количество кратеров в этих озерах может достигать десятков, сотен и даже тысяч.

Район поселка Сеяха уникален — здесь впервые для севера Западной Сибири в конце 1970-х годов Ю. К. Васильчук встретил и детально исследовал едомые толщи [4]. Едомые отложения в окрестностях Сеяхи столь мощные и льдистые, что в них построен крупный мерзлотник (туда может заехать грузовик) для хранения рыбы, оленьего мяса и т. п. Согласно определению Ю. К. Васильчука, едома — это льдонасыщенные (объемная льдистость 50–90%) содержащие органический материал (более 1–2% C_{org}) глинистые и суглинистые, супесчано-суглинистые и песчаные позднелайстоценовые отложения (в склоновых и аллювиальных осадках иногда с крупнообломочным материалом), содержащие мощные (шириной от 1 до 3–3,5 м и высотой 15–20 м и более) сингенетические повторно-жильные льды, часто многоярусные. Возраст едомых отложений варьирует от 11,7 до более 40–50 тыс. калиброванных (далее — кал.) лет [5]. Едомые толщи широко распространены на обширных пространствах севера Сибири и на арктических островах, но долгое время считалось, что для севера Западной Сибири едомые толщи не характерны. К настоящему времени на полуостровах Ямал и Гыданский едомые толщи исследованы (рис. 1в) также в районе полярной станции «Марре-Сале», в районе поселка Бованенково и в устье реки Еры-Маретаяха [6–10].

Находки едомых толщ на севере Западной Сибири — важный признак существования неледниковых, но достаточно суровых геоэкологических условий во время последнего ледникового макси-

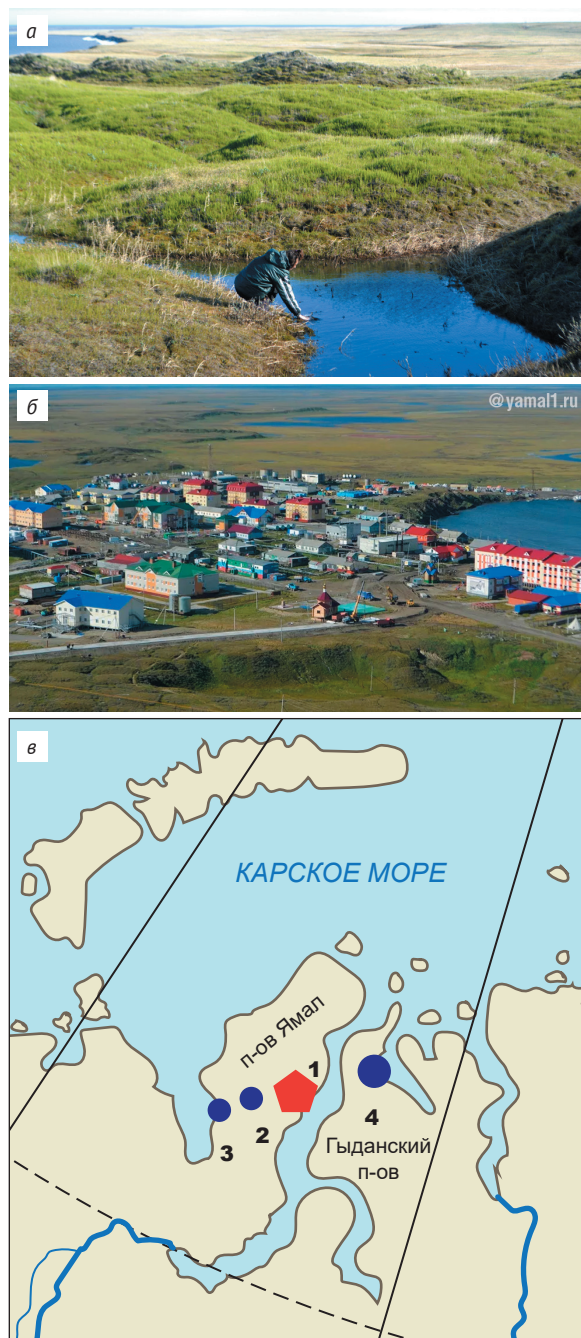


Рис. 1. Многолетнемерзлый торфяной массив, расчлененный термоэрозией на отдельные бугры (а) на третьей террасе вблизи поселка Сеяха (фото Ю. К. Васильчука), б — современный вид поселка Сеяха, бугристый полигональный рельеф виден на окраине (в нижнем левом углу снимка), в — районы исследований едомых толщ на севере Западной Сибири: поселка Сеяха (1), стационара «Васькины Дачи» (2), стационара «Марре-Сале» (3), устья реки Еры-Маретаяха (4)

Fig. 1. Permafrost peatland dissected by thermal erosion into separate high-centered polygons (a) on the third marine terrace near the Seyakha settlement (photo by Yu. K. Vasil'chuk), б — present view of the Seyakha settlement, high-centered polygons are visible on the outskirts of the village (in the lower left corner of the image), в — location of yedoma sites in the north of Western Siberia: the Seyakha settlement (1), Vas'kiny Dachi station (2), Marre-Sale station (3), mouth of the Ery-Maretayakha River (4)



Рис. 2. Едомная толща в обнажении третьей морской террасы на побережье Обской губы вблизи поселка Сеяха, восточное побережье полуострова Ямал. Фото А. К. Васильчук, 1996 г.
Fig. 2. Yedoma strata in the exposure of the third marine terrace on the coast of the Ob Bay near the Seyakha settlement, eastern coast of the Yamal Peninsula. Photo by A. Vasil'chuk, 1996

му, поскольку аккумуляция едомы может происходить только во внеледниковых условиях. Согласно некоторым исследованиям [11], так называемый Баренцево-Карский ледниковый покров покрывал большую часть севера Сибири, включая полуостров Ямал. Исследование едомной толщи с сингенетическими ледяными жилами в районе поселка Сеяха на восточном побережье Ямала [4], датирование вмещающих отложений и самих жил привели к значительному уточнению границы Баренцево-Карского ледникового покрова в позднем плейстоцене. Используя эти данные, Дж. Свендсен и др. [12; 13], а также А. Хьюз и др. [14] пришли к выводу, что 29—21 тыс. лет назад ледниковый покров не достиг северного края материка Западной Сибири и европейского сектора Северной России, его граница, по их мнению, проходила в Карском море к западу от полуострова Ямал.

Целью проведенного исследования являлось установление времени аккумуляции Сеяхинской едомной толщи на основе сопоставления радиоуглеродных датировок, полученных по вмещающим отложениям и с применением ускорительной масс-спектрометрии (AMS) по органическим микровключениям из жильных льдов, и оценка среднеянварских температур воздуха в период формирования Сеяхинской едомы 30—13 тыс. лет назад на основе изотопно-кислородных данных по повтор-

но-жильным льдам, а также сопоставление изотопных диаграмм по Сеяхинской едоме с изотопными кривыми, полученными в соседних районах полуостровов Ямал, Гыданский и Таймыр, для выявления общих черт и различий формирования изотопного состава и палеотемпературного развития.

Полученные результаты позволяют оценить степень суровости геокриологических условий завершающей стадии позднего плейстоцена на севере Западной Сибири и могут быть использованы для прогноза эксплуатации Северного морского пути и объектов инфраструктуры при изменении климата и увеличении интенсивности техногенного воздействия в исследуемом регионе.

Методы исследований

Полевые работы. Исследованная едомная толща вскрыта в обнажении третьей лагунно-морской террасы (рис. 2), в 1978—1979 и 1996 гг. была исследована центральная часть обнажения общей высотой 22 м (рис. 3а и 3б), в 2016 г. — краевая часть едомы высотой около 17 м (рис. 3в).

В ходе полевых исследований в разные годы проводился отбор органического материала из вмещающих жил отложений для традиционного (конвенционального, сцинтилляционного) радиоуглеродного датирования. В процессе полевых исследований 1996 и 2016 гг. из нескольких жил были

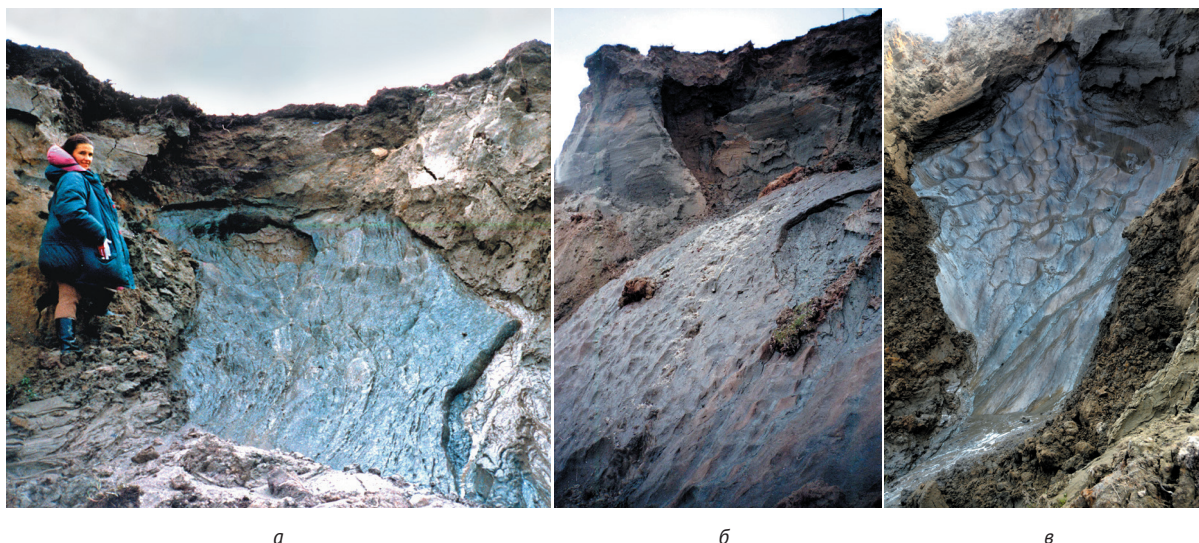


Рис. 3. Обнажение Сеяхинской едомы: а, б — центральная часть обнажения (а — ледяная жила среднего яруса, б — ледяная жила верхнего яруса), в — ледяная жила в краевой части обнажения. Фото Ю. К. Васильчука, 1996 г.
Fig. 3. Exposure of the Seyakha yedoma: а, б — central part of the exposure (а — ice wedge of the middle tier; б — ice wedge of the upper tier), в — ice wedge in the peripheral part of the exposure. Photo by Yu. K. Vasil'chuk, 1996

отобраны крупные блоки льда, из которых были извлечены органические включения для AMS ^{14}C датирования. Образцы льда (предварительно вымытые в воде, полученной от таяния жильного льда) таяли при температуре около 5°C и выстаивались не менее 24 ч. Затем осадок собирался в пластиковые контейнеры. Также произведен отбор льда для анализа стабильных изотопов из тех же жил вдоль вертикального и горизонтального профилей. Каждый образец льда помещался в двойной пластиковый пакет, лед таял при температуре немного выше 0°C , переливался в пластиковый флакон и заматывался парафильмом для минимизации испарения.

Радиоуглеродные измерения возраста. Традиционное радиоуглеродное датирование вмещающих отложений. Датирование органики из вмещающих жилы отложений выполнено с помощью традиционного метода датирования в Институте истории материальной культуры РАН (индекс Ле), Геологическом институте РАН (индекс ГИН) и радиоуглеродной лаборатории Университета Хельсинки, Финляндия (индекс Hel). Из одного образца был выделен фрагмент мха, который был датирован с применением AMS в университетах Хельсинки и Упсалы (индекс Hela).

AMS радиоуглеродное датирование органики, извлеченной из ледяных жил. Осадок с органическим материалом химически обработан для извлечения щелочной фракции — растворенный органический углерод (dissolved organic carbon — DOC) и фракции более 400 мк — нерастворенные органические частицы (particulate organic carbon — POC) для каждого образца. Эти две фракции затем были отдельно подготовлены для анализа: они сжигались в автоматическом элемент-анализаторе Carlo Erba 1500, соединенном с Micromass Optima IRMS и газохроматографической колонкой. Первые радиоуглеродные

определения микроорганики из жил методом AMS (по итогам полевых сборов 1996 г.) были сделаны в центре изотопных исследований Гронингенского университета (индекс GrA), Нидерланды [15]. AMS радиоуглеродное датирование органики из жильного льда (суммарный органический углерод, total organic carbon — TOC, отобранной в 2016 г., было проведено в лаборатории радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии Института географии РАН (получение счетного материала, индекс IGAN_{AMS}) и Центра изотопных исследований Университета Джорджии, США (получение AMS датировки). Калибровка всех полученных датировок проведена с применением программы Oxcal 4.4 на основе базы данных IntCal20 [16; 17], даты приведены в виде тысяч калиброванных лет назад.

Измерения стабильных изотопов. Определение изотопного состава кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) в образцах жильного льда, отобранного в течение полевых исследований 1979 г., были выполнены в лаборатории изотопной гидрологии Института водных проблем РАН (А. Д. Есиков), образцы полевых исследований 1996 г. проанализированы в изотопной лаборатории университета Хельсинки, Финляндия (Э. Соннинен и профессор Х. Юнгнер), парные изотопные определения кислорода и водорода ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) выполнены в изотопной лаборатории Ганновера, Германия (профессор М. Гей). Определение $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ во льду жил, отобранных в 2016 г., выполнялось в лаборатории стабильных изотопов географического факультета МГУ на масс-спектрометре Delta-V Plus с использованием комплекса газ-бенч (профессор Ю. Васильчук и старший научный сотрудник Н. Буданцева). Для калибровки измерений использовались международные стандарты V-SMOW, GRES, GISP и SLAP. Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ выражены в промилле относи-

тельно VSMOW. Погрешность определений составила $\pm 1\text{‰}$ для $\delta^2\text{H}$ и $\pm 0,4\text{‰}$ для $\delta^1\text{O}$.

Палеотемпературные реконструкции. Реконструкции среднеянварской температуры воздуха $T_{\text{ср.январь}}$ ($^{\circ}\text{C}$) основаны на зависимости, полученной при сопоставлении изотопного состава современных жильных ростков ($\delta^{18}\text{O}_{\text{ж.р.}}$) и современной среднеянварской температуры воздуха для периода формирования этих ростков [5; 18] с учетом вариаций зимних температур воздуха на севере Западной Сибири, отмеченных за период регулярных метеонаблюдений (с 1930 по 2000 гг.). Для расчетов $T_{\text{ср.январь}}$ было использовано уравнение

$$T_{\text{ср.январь}} = 1,42\delta^{18}\text{O}_{\text{ж.р.}} (\pm 3^{\circ}\text{C}). \quad (1)$$

Погрешность $\pm 3^{\circ}\text{C}$ показывает средний диапазон варируемости реконструируемых температур в пределах анализируемого временного интервала.

Наклон линии соотношения $\delta^2\text{H}-\delta^1\text{O}$ для жильного льда рассматривался 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.

Обсуждение результатов

Криостратиграфия

По результатам исследования разреза в момент наилучшего его вскрытия выделены три криостратиграфических горизонта (рис. 4а). Нижний горизонт мощностью 11 м представлен переслаиванием серых легких супесей и торфа, частично аллохтонного. Очевидно, что эти отложения накопились при неоднократной смене режима осадконакопления с субэвального на субаквальный. Этот горизонт содержит сингенетические повторно-жильные льды, в верхней части их ширина достигает 3 м. Средний горизонт слоистых супесей с низким содержанием органических включений мощностью 10 м пронизан узкими (1—1,5 м) ледяными жилами с вертикальными прослоями минеральных включений. Самый верхний горизонт мощностью от 2 до 3 м сложен желтым мелким горизонтально слоистым песком, в котором был определен комплекс сохранившихся *in situ* солоноватоводных фораминифер. Этот горизонт пронизывают ледяные жилы верхнего яруса шириной в верхней части около 1,5 м [44; 19].

В краевой части обнажения едомы отмечены два яруса ледяных жил (рис. 4б) и соответственно выделены два горизонта. Нижний горизонт мощностью 5—7 м представлен слоистой супесчаной пачкой, для него характерно парагенетическое сочетание ледяных жил и слоя сегрегационного льда, мощность ледяных жил 2—3 м. Верхние 5 м разреза краевой части представлены пылеватым песком с супесью и органикой. Горизонт пронизан пятиметровыми ледяными жилами шириной 1—1,5 м в верхней ча-

сти. Исследована стратиграфия байджедра (блока мерзлых отложений, просевшего в результате вытаивания ледяных жил), расположенного вблизи обнажения на пляже Обской губы. На высоте от 0 до 7 м встречены прослои торфа, содержащие остатки кустарничков и гипновых мхов.

Радиоуглеродный возраст отложений и ледяных жил

По вмещающим отложениям из центральной части едомы ранее была получена серия ^{14}C датировок от 13,5 тыс. кал. лет на высоте 21 м до 41 тыс. кал. лет на высоте 1 м (см. рис. 4а, табл. 1). По трем фрагментам ледяных жил из средней части обнажения были получены ^{14}C AMS датировки 17,8, 18 и 25,3 тыс. кал. лет [19]. Датировку 17,8 тыс. кал. лет из жилы верхнего яруса (см. рис. 5а) можно считать удрежденной вследствие возможного загрязнения датируемого материала более древней органикой, которая попала в морозобойную трещину в виде органической пыли, раздуваемой из ближайших древних отложений, или попавшей в жилу вместе с талым снегом. Доказательством этого предположения является высокое содержание переотложенной пыльцы и спор доплейстоценового возраста в верхней части едомной толщи. Окончание аккумуляции едомы и роста повторно-жильных льдов можно считать по датировке 13,5 тыс. кал. лет из верхней части едомы на глубине 0,8 м.

Сопоставление датировок по органике из ледяных жил (от 25,3 до 18 тыс. кал. лет) и по вмещающим отложениям из центральной части едомы (от 42 до 27—28 тыс. кал. лет) показывает несоответствие (см. рис. 4а), указывающее на то, что отложения могут быть частично загрязнены древним органическим материалом. Известно, что переотложенная органика является одной из основных проблем датирования синкриогенных многолетнемерзлых отложений, включая едому [20]. Все едомные отложения в аллювиальных условиях когда-то были на уровне пляжа, и большая часть материала была вымыта и переотложена из более древних отложений. Термоабразия способствует вымыванию из отложений древнего органического материала, который потом откладывается в виде почти чистой органики на низких элементах рельефа (пляж, береговые отмели, лайда). Например, образец торфа, отобранного на современном пляже под обнажением Сеяхинской едомы, был датирован 15,5 тыс. кал. лет (см. табл. 1). Этот торф по внешнему виду и составу идентичен торфу в обнажении едомы и часто идентифицируется как автохтонный, хотя, конечно, это аллохтонный материал. Подобное переотложение может удреждать датировки на тысячи и десятки тысяч лет.

Для краевой части Сеяхинской едомы получены четыре новые AMS ^{14}C датировки по повторно-жильным льдам. Жила из средней части датирована от

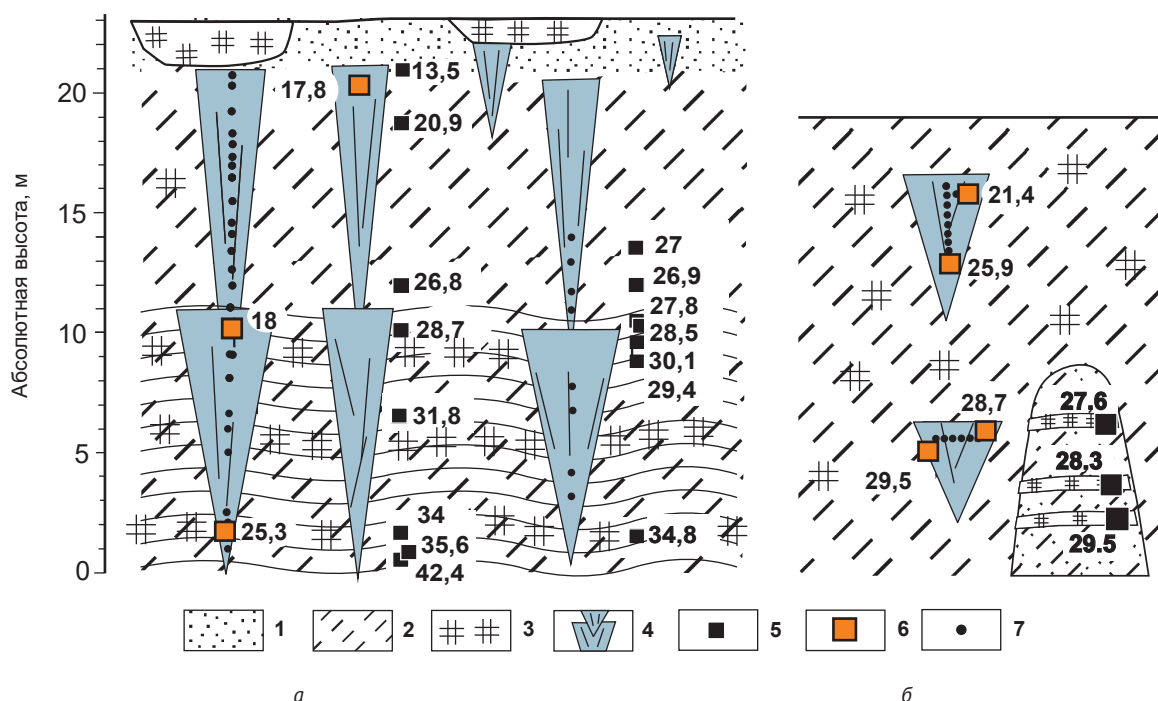


Рис. 4. Криостратиграфия обнажения Сеяхинской едомы в центральной (а) и краевой (б) частях. Радиоуглеродный возраст ледяных жил и вмещающих отложений: 1 – песок, 2 – супесь, 3 – торф, 4 – ледяные жилы, 5 – ^{14}C датировки по вмещающим отложениям, 6 – ^{14}C AMS датировки по микровключениям органики из жильного льда, 7 – отбор образцов жильного льда на изотопный анализ

Fig. 4. Cryostratigraphy of the Seyakha yedoma exposure in central part (a) and edge part (b), radiocarbon age of ice wedges and enclosing sediments: 1 – sand, 2 – silt, 3 – peat, 4 – ice wedges, 5 – ^{14}C dates of the enclosing sediments, 6 – ^{14}C AMS dates of organic microinclusions in the ice wedges, 7 – sampling points for stable isotope analysis

Таблица 1. Радиоуглеродный возраст органики из повторно-жильных льдов и вмещающих отложений Сеяхинской едомы

Table 1. Radiocarbon age of the organic microinclusions from ice wedges and enclosing sediments of the Seyakha yedoma

Лабораторный номер	Абсолютная высота над уровнем моря, м	^{14}C датировка, лет (1σ)	Возрастной интервал (2σ) с вероятностью 95,4%, кал. лет	Медианный калиброванный возраст, лет	Датируемый материал
Центральная часть обнажения					
AMS ^{14}C датировки органики из жильного льда					
GrA-10538	20,2	$14\,550 \pm 100$	18 127—17 421	17 768	ПОС
GrA-10539	10,0	$14\,720 \pm 100$	18 254—17 742	18 032	ПОС
GrA-10536	1,4	$20\,960 \pm 140$	25 678—24 966	25 296	ПОС
Традиционные (конвенциональные) ^{14}C датировки вмещающих жилы отложений					
Hel-3942	21,2	$11\,620 \pm 150$	13 790—13 181	13 486	Торф
Hel-4023	18,8	$17\,290 \pm 250$	21 725—20 317	20 904	Торф
ГИН-2473	13,4	$22\,700 \pm 300$	27 621—26 370	26 979	Торф
ГИН-2475	12,0	$22\,600 \pm 600$	28 059—25 771	26 880	Торф
ГИН-8931	11,0	$22\,510 \pm 330$	27 353—26 014	26 790	Торф
ГИН-2474	10,0	$23\,500 \pm 400$	28 679—27 133	27 731	Торф

Лабораторный номер	Абсолютная высота над уровнем моря, м	^{14}C датировка, лет (1σ)	Возрастной интервал (2σ) с вероятностью 95,4%, кал. лет	Медианный калиброванный возраст, лет	Датируемый материал
ГИН-2476	10,0	24 300 $\pm$ 300	29 107—27 842	28 480	Торф
ГИН-4043	10,0	24 460 $\pm$ 650	30 071—27 484	28 725	Торф
МГУ-1017	9,5	24 760 $\pm$ 2500	40 136—24 549	30 092	Торф
МГУ-1016	9,0	25 000 $\pm$ 1200	32 160—27 110	29 396	Торф
Hel-3943	6,8	27 890 $\pm$ 90	32 043—31 557	31 792	Торф
ГИН-8936	1,5	29 500 $\pm$ 400	34 772—33 024	33 999	Торф
ГИН-2477	1,1	30 100 $\pm$ 1500	39 112—31 551	34 785	Торф
Hela-201	1,1	31 200 $\pm$ 90	35 947—35 293	35 561	Стебелек мха
Hel-3950	1,1	36 800 $\pm$ 3300 –2100	54 435—36 339	42 426	Торф
Краевая часть обнажения					
<i>AMS ^{14}C датировки органики из жильного льда</i>					
IGAN _{AMS} -7335	15,2	17 680 $\pm$ 50	21 738—21 126	21 399	ТОС
IGAN _{AMS} -7338	12,1	21 755 $\pm$ 55	26 245—25 859	25 969	ТОС
IGAN _{AMS} -6907	6,0	24 495 $\pm$ 80	29 005—28 758	28 755	ТОС
IGAN _{AMS} -6908	6,0	25 281 $\pm$ 80	29 875—29 241	29 551	ТОС
<i>Традиционные (конвенциональные) ^{14}C датировки вмещающих жилы отложений</i>					
Ле-11408	2,0	25 200 $\pm$ 420	30 325—28 645	29 497	Торф
Ле-11407	3,0	24 100 $\pm$ 300	28 294—27 736	28 292	Торф
Ле-11406	5,0	23 300 $\pm$ 640	29 865—25 902	27 596	Торф
Ле-11409	0 (пляж Обской губы)	12 950 $\pm$ 100	15 783—15 200	15 488	Торф

21 до 25 тыс. кал. лет, жила из нижнего фрагмента датирована от 29 до 30 тыс. кал. лет — это самые древние датировки, полученные по жилам Сеяхинской едомы (см. рис. 4б, табл. 1).

Радиоуглеродные датировки микровключений органики из ледяных жил (см. рис. 4б) из разреза краевой части едомы образуют безынверсионный ряд (от 29 до 21 тыс. кал. лет назад) и соответствуют датировкам центральной части едомы (см. рис. 4а). Датировки микровключений органики из нижнего яруса ледяных жил находятся в полном соответствии с датировками, полученными из отложений байдже-рах (см. рис. 4б) с учетом смещения байдже-рах.

Следует пояснить, что отложения байдже-рах просели максимум на 1,5 м в результате вытаивания жилы. Поэтому датированные горизонты органики из этого байдже-рах первично были расположены на высоте от 3,5 до 6,5 м, т. е. на высоте фрагмента

жилы нижнего яруса. В связи с этим можно полагать, что нижний ярус жил здесь начал формироваться сингенетично вмещающим отложениям, около 30—28 тыс. кал. лет назад.

Вариации стабильных изотопов в повторно-жильных льдах

По ледяным жилам в центральной части Сеяхинской едомы ранее были получены характеристики изотопно-кислородного состава [19]: по жилам нижнего яруса — значения $\delta^{18}\text{O}$ от $-23,5\text{‰}$ до $-24,8\text{‰}$, по жилам верхнего яруса — от $-20,4\text{‰}$ до $-24,5\text{‰}$ (табл. 2). Новые высокоразрешающие (с шагом детализации 80—100 лет) изотопно-кислородные кривые получены по ледяным жилам из краевой части едомы. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в жиле верхнего яруса варьируют от $-25,8\text{‰}$ до $-23,2\text{‰}$. По нижнему фрагменту жилы (вскрытому на высоте 5—6 м) получены ва-

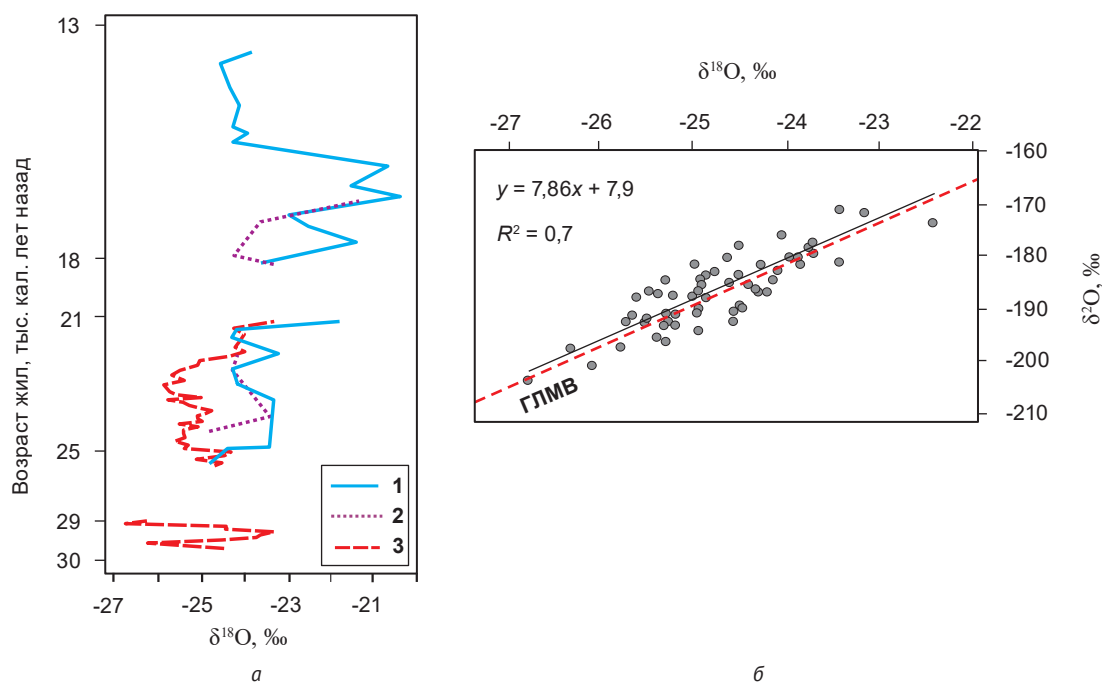


Рис. 5. Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ во льду датированных ледяных жил Сеяхинской едомы (а) для периода от 30 до 13 тыс. кал. лет назад (1, 2 – изотопные диаграммы по жилам из центральной части едомы; 3 – изотопные диаграммы по жилам из краевой части едомы) и соотношение $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ во льду жил краевой части едомы (б). ГЛМВ – глобальная линия метеорных вод
Fig. 5. $\delta^{18}\text{O}$ diagrams for dated ice wedges of the Seyakha yedoma (a) for the period from 30 to 13 thousand calibrated years ago (1, 2 – isotope diagrams for the central part of yedoma exposure, 3 – isotope diagrams for the edge part of yedoma exposure) and $\delta^2\text{H}$ – $\delta^{18}\text{O}$ ratio in ice wedges from the peripheral part of the yedoma exposure (b). GMWL – global meteoric water line

Таблица 2. Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ (минимальные, средние, максимальные) в повторно-жильных льдах, вскрытых в отложениях Сеяхинской едомы

Table 2. $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values (minimum, mean, and maximum) of ice wedges exposed in the Seyakha yedoma

Фрагмент обнажения	Число проб	δ ¹⁸ O, ‰			δ ² H, ‰		
		Мин.	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.
Краевая часть едомы (отбор 2016 г.)							
Жила верхнего яруса	48	–25,8	–24,8	–23,2	–197,5	–186,2	–170,6
Жила нижнего яруса	11	–26,7	–24,8	–23,4	–203,9	–190,2	–178,9
Центральная часть едомы (отбор 1996 г.)							
Жила верхнего яруса	14	–24,5	–23,0	–20,4	—	—	—
Жила нижнего яруса	10	–24,8	–23,8	–22,0	—	—	—
Центральная часть едомы (отбор 1979 г.)							
Жила верхнего яруса	4	–24,2	–23,1	–21,4	—	—	—
Жила нижнего яруса	4	–24,8	–24,2	–23,5	—	—	—

риации значений $\delta^{18}\text{O}$ в диапазоне, близком к полученному для верхнего фрагмента: от –23,4‰ до –26,7‰ (см. табл. 2, рис. 5а).

О формировании повторно-жильного льда преимущественно из талой снежной воды, не подвергавшейся заметному изотопному фракционированию и не смешивавшейся с поверхностными водами,

свидетельствует значение наклона линии соотношения $\delta^2\text{H}$ – $\delta^{18}\text{O}$ для образцов жильного льда, которое равно 7,86 (см. рис. 5б), поскольку это значение приближено к значению наклона глобальной линии метеорных вод. Таким образом, полученные значения $\delta^{18}\text{O}$ могут быть использованы для палеотемпературных расчетов.

Хронологическая привязка изотопных диаграмм и палеотемпературные реконструкции

Изотопные данные, полученные по фрагментам ледяных жил Сеяхинской едомы, можно отнести к трем периодам позднего плейстоцена. Фрагмент жилы в краевой части едомы датирован 29,6—28,8 тыс. кал. лет, значения $\delta^{18}\text{O}$ в этом фрагменте варьируют от $-23,4\text{‰}$ до $-26,7\text{‰}$.

Судя по полученной ^{14}C AMS датировке (25,3 тыс. кал. лет назад) из льда жилы в центральной части едомы, жилы здесь формировались около 25—26 тыс. кал. лет назад и, вероятно, немного раньше, т. е. они почти синхронны жиле из краевой части едомы, датированной от 25,9 до 21,4 тыс. кал. лет. Значения изотопного состава льда этих синхронных жил оказались довольно близкими, $\delta^{18}\text{O}$ варьировали от -22‰ до $-24,8\text{‰}$ в жилах из центральной части едомы и от $-23,2\text{‰}$ до $-25,8\text{‰}$ в жиле из краевой части. Для жил центральной части едомы, формировавшихся в период от 18 до 13 тыс. кал. лет назад, получены вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ от $-20,4\text{‰}$ до $-24,5\text{‰}$ [4; 19].

Приблизительные палеотемпературные расчеты, выполненные с использованием уравнения (1) показывают, что в период около 30—29 тыс. кал. лет назад $T_{\text{ср.январь}}$ варьировала от -38°C до -33°C , в период 26—21 тыс. кал. лет назад $T_{\text{ср.январь}}$ варьировала между -36°C и -31°C и на завершающем этапе развития едомной толщи — 18—13 тыс. кал. лет назад — $T_{\text{ср.январь}}$ варьировала от -35°C до -29°C . В целом можно отметить, что значения $T_{\text{ср.январь}}$ в период аккумуляции едомной толщи были заметно ниже современных значений в районе поселка Сеяха (составляют сейчас в среднем -24°C), при этом отмечается незначительное повышение значений $T_{\text{ср.январь}}$ от 30—29 до 13 тыс. кал. лет назад.

Синхронность развития фрагментов едомных толщ в западном секторе сибирской Арктики в позднем плейстоцене

Сопоставление данных радиоуглеродного датирования фрагментов Сеяхинской едомы с исследованными едомными толщами Ямала (стационар «Марре-Сале», $69,72^\circ$ с. ш., $66,80^\circ$ в. д., стационар «Васькины дачи», $70^\circ 13' 57,632$ с. ш., $69^\circ 0' 58,485$ в. д.), Гыданского полуострова (устье реки Еры-Маретаяха, $71,8333^\circ$ с. ш., $75,2167^\circ$ в. д.) и полуострова Таймыр (мыс Саблера, $74,5500^\circ$ с. ш., $100,5333^\circ$ в. д.) показало синхронность аккумуляции едомных отложений, а сравнение изотопных данных по жилам из едомных толщ Ямала — близкие значения в синхронных фрагментах жил.

В районе стационара «Марре-Сале» на западном побережье Ямала аккумуляция эоловых и флювиальных отложений и формирование в этих отложениях повторно-жильных льдов происходили между 40 и 11 тыс. лет назад. По льдистым супесям, вмещающим крупные сингенетические повторно-жильные льды, получена серия датировок от 16,4 до 12,2 тыс. лет (от 19,7 до 14,2 тыс. кал. лет).

Значения $\delta^{18}\text{O}$ в жилах варьировали от $-24,8\text{‰}$ до $-23,4\text{‰}$ (табл. 3), среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ составляет $-24,2\text{‰}$. Значения $\delta^2\text{H}$ в жилах варьировали от $-190,6\text{‰}$ до $-179,3\text{‰}$, графически значения $\delta^2\text{H}$ – $\delta^{18}\text{O}$ жильного льда расположены вблизи глобальной линии метеорных вод [8; 10]. Согласно выводам И. Д. Стрелецкой с соавторами [8], среднезимние температуры воздуха в конце плейстоцена были ниже современных на $5\text{—}7^\circ\text{C}$. Расчет, выполненный [8] по уравнению Ю. К. Васильчука [5], позволяет предполагать, что среднеянварские температуры воздуха в период формирования жил составляли примерно -36°C ; уточненный расчет по уравнению (1) по этим данным дает величину среднеянварской температуры воздуха в период формирования жил в Марре-Сале около $-34,4^\circ\text{C}$ (см. табл. 3).

Ю. Н. Чижова проанализировала изотопный состав сингенетических ледяных жил в одном из термоцирков в районе стационара «Васькины дачи», вблизи Бованенковского газоконденсатного месторождения, центральный Ямал. По образцу льда на уровне головы одной из жил была получена радиоуглеродная датировка 13,6 тыс. кал. лет. Это позволяет сделать вывод, что возраст жилы не моложе 13 тыс. лет, т. е. время конца изотопной стадии МИС-2, длившейся от 29 до 11,7 тыс. кал. лет назад. Значения $\delta^{18}\text{O}$ во льду жилы изменяются от $-26,2\text{‰}$ до $-21,2\text{‰}$, значения $\delta^2\text{H}$ — от $-203,1\text{‰}$ до $-157,5\text{‰}$ соответственно. Средние значения: $\delta^{18}\text{O} = -24,8\text{‰}$ и $\delta^2\text{H} = -187,6\text{‰}$. Все полученные изотопные значения можно описать уравнением линейной регрессии $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10,5$ ($R^2 = 0,9$). При этом графически образцы жильного льда в основном расположены вблизи линии метеорных вод. Палеотемпературная интерпретация, выполненная по формуле Ю. К. Васильчука [9], показала, что среднезимняя температура воздуха времени формирования жилы составляла около $-24,8 \pm 2^\circ\text{C}$, среднеянварская — около $-37,2 \pm 3^\circ\text{C}$ [9]. Уточненный расчет с коэффициентом 1,42 по этим данным дает величину среднеянварской температуры воздуха -35°C для периода роста жил (см. табл. 3).

В устье реки Еры-Маретаяха позднеплейстоценовые повторно-жильные льды изучены в обнажении берегового уступа, которое состоит из термоденудационных поверхностей с высотами 10—25 м. ^{14}C датировка $21\,930 \pm 370$ лет (26,3 тыс. кал. лет) по горизонту торфа на глубине 7 м может фиксировать раннюю стадию развития едомной толщи, исследованные фрагменты жил расположены гипсометрически выше, и скорее всего они моложе. По льду одной из жил в этом фрагменте едомы получены значения $\delta^{18}\text{O}$ от $-24,6\text{‰}$ до $-22,6\text{‰}$, среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ -24‰ (см. табл. 3). Средняя температура января во время формирования жил оценена в $-36 \pm 3^\circ\text{C}$ [7; 8]. Уточненный расчет с коэффициентом 1,42 по этим данным дает величину среднеянварской температуры воздуха в период формирования жил -34°C (см. табл. 3).

Таблица 3. ^{14}C датировки фрагментов едомных толщ севера Западной Сибири, значения $\delta^{18}\text{O}$ в повторно-жильных льдах выделенных фрагментов и реконструированные приблизительные среднеянварские температуры воздуха в периоды формирования жил

Table 3. ^{14}C dates in the north of the Western Siberia yedoma fragments, $\delta^{18}\text{O}$ values in ice wedges from these fragments and reconstructed mean January air temperatures for the time of ice wedge formation

Участок исследованных едомных толщ	^{14}C датировки микроорганики из ПЖЛ (*) и вмещающих отложений фрагмента едомы, тыс. кал. лет	Приблизительный период формирования ПЖЛ, тыс. кал. лет	Значения $\delta^{18}\text{O}$ (‰) во льду ПЖЛ датированных фрагментов **	Реконструированная $T_{\text{ср.январь}}^{\circ\text{C}} (\pm 3^{\circ\text{C}})$ в течение периода формирования фрагмента едомы ***	Ссылка
Поселок Сеяха, полуостров Ямал	13,5 18	18—13	–24,5/–23/–20,4	–32,7	Данные авторов
	21,4* 25,3* 25,9*	26—21	–25,8/–24,3/–22	–34,5	
	28,7* 29,5*	30—29	–26,7/–24,8/–23,4	–35,2	
Стационар «Васькины дачи», полуостров Ямал	13,6	29—12	–26,2/–24,8/–21,2	–37,2/–35,2	[9]
Стационар «Марре-Сале», полуостров Ямал	14,2 19,7	20—14	–24,8/–24,2/–23,4	–34,4	[8; 10]
Устье реки Еры-Маретаяха, Гыданский полуостров	26,3	26—12	–24,6/–24/–22,6	–36/–34,1	[7; 8]

** Значения $\delta^{18}\text{O}$: минимальное/среднее/максимальное.

*** Значение авторов исследования/значение, рассчитанное по уточненному уравнению (1).

Диапазон и среднее значение изотопно-кислородного состава позднеплейстоценовых жил, датированных от 29 до 13—12 тыс. кал. лет (стадия МИС-2), близки к изотопным значениям для синхронных жил Сеяхинской едомы, что подтверждает близкие зимние температурные условия формирования едомных толщ в период между 29 и 13—12 тыс. кал. лет назад.

Стратиграфические и геоморфологические данные, а также ряды ^{14}C датировок не поддерживают гипотезу существования ледникового покрова и даже близкое положение границы ледника в западном секторе севера Сибири (на полуостровах Ямал, Гыданский, а также на полуострове Таймыр) в период 30—29 и 13—12 тыс. кал. лет назад. При этом зимние климатические условия были гораздо суровее современных: средняя температура января была в среднем на 10°C ниже современной и варьировала от –35°C, –33°C на Ямале и Гыданском полуострове до –44°C, –40°C на полуострове Таймыр, что обусловило активный рост мощных синге-

нетических повторно-жильных льдов. Этот вывод хорошо согласуется с данными по Полярному Уралу, где в этот период (между 30 и 12 тыс. кал. лет назад, в течение изотопной стадии МИС-2) в условиях холодных и сухих зим могли формироваться только небольшие локальные ледники [13].

Выводы

1. Едомные толщи с мощными ледяными жилами (высотой более 20 м) формировались на севере Западной Сибири в течение позднеплейстоценового криохрона (датируемого от 50 до 11,7 тыс. кал. лет назад). Прямое датирование жил Сеяхинской едомы на полуострове Ямал показало, что жилы формировались между 30 и 18 тыс. кал. лет назад, завершение формирования Сеяхинской едомной толщи можно датировать временем 13 тыс. кал. лет назад. В разные годы с интервалом более 35 лет в разных фрагментах Сеяхинской едомы на тех же глубинах получены сходные радиоуглеродные и изотопные результаты.

2. Среднее значение изотопно-кислородного состава ($\delta^{18}\text{O}$) ледяных жил, формировавшихся 30—29 тыс. кал. лет назад, составляет $-24,8\text{‰}$; в жилах, формировавшихся между 26 и 21 тыс. кал. лет назад, среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ составило $-24,8\text{‰}$, а в жилах, формировавшихся между 18 и 13 тыс. кал. лет назад, среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ составило -23‰ . Максимальный диапазон вариаций значений $\delta^{18}\text{O}$ в жилах Сеяхинской едомы составляет $6,4\text{‰}$ и варьирует от $-20,4\text{‰}$ до $-26,7\text{‰}$.

3. Сопоставление изотопно-кислородных значений по ледяным жилам Сеяхинской едомы с фрагментами жил едомных толщ Ямала и Гыданского полуострова, формировавшихся в течение 30—12 тыс. кал. лет назад, показывает близкие значения как диапазона вариаций значений $\delta^{18}\text{O}$, так и средних значений, составляющих от -24‰ до $-24,8\text{‰}$.

4. Приблизительная реконструированная среднеянварская температура воздуха для периода 30—13 тыс. кал. лет назад для района поселка Сеяха варьировала от -35°C до -33°C , что в среднем на 10°C ниже современной; отмечено повышение значений среднеянварской температуры на завершающем этапе развития едомы между 18 и 13 тыс. кал. лет назад.

5. Активное развитие едомных толщ доказывает, что равнинные территории Западной Сибири не были покрыты ледниковым щитом в течение последнего ледникового максимума (датируемого между 29 и 21 тыс. кал. лет назад).

Финансирование

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

Литература/References

- Губарьков А. А. Взаимосвязь гидрологических и криогенных процессов в бассейнах малых рек на побережье Карского региона: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Тюмень, 2009. — 16 с.
Gubar'kov A. A. Interrelation of hydrological and cryogenic processes in the basins of small rivers on the coast of the Kara region. Summary of PhD Thesis (in technical sciences). Tyumen, 2009, 16 p. (In Russian).
- Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н. Катастрофический выброс газа в 2020 г. на полуострове Ямал в Арктике. Результаты комплексного анализа данных аэрокосмического зондирования // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 3. — С. 362—374. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-362-374.
Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N. Catastrophic gas blowout in 2020 on the Yamal Peninsula in the Arctic. Results of comprehensive analysis of aerospace RS data. Arctic: Ecology and Economy, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 362—374. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-362-374. (In Russian).
- Богоявленский В. И., Сизов О. С., Никонов Р. А. и др. Дегазация Земли в Арктике: генезис природной

и антропогенной эмиссии метана // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 3 (39). — С. 6—22. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-6-22.

Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. A. Earth degassing in the Arctic: the genesis of natural and anthropogenic methane emissions. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 3 (39), pp. 6—22. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-6-22. (In Russian).

4. Васильчук Ю. К., Трофимов В. Т. Изотопно-кислородная диаграмма повторно-жильных льдов Западной Сибири, ее радиологический возраст и палеогеокриологическая интерпретация // Докл. Акад. наук СССР. — 1984. — Т. 275, № 2. — С. 425—428.

Vasil'chuk Yu. K., Trofimov V. T. Isotope-oxygen diagram of ice wedges of Western Siberia, its radiological age and paleogeocryological interpretation. Doklady Akademii Nauk SSSR [Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR], 1984, vol. 275, no. 2, pp. 425—428. (In Russian).

5. 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).

6. Болиховский В. Ф. Едомные отложения Западной Сибири // Новые данные по геохронологии четвертичного периода. — М.: Наука, 1987. — С. 128—135.
Bolikhovsky V. F. Yedoma deposits of Western Siberia. Novye dannye po geokhronologii chetvertichnogo perioda [New data on the geochronology of the Quaternary period]. Moscow, Nauka, 1987, pp. 128—135. (In Russian).

7. Облогов Г. Е., Стрелецкая И. Д., Васильев А. А. и др. Четвертичные отложения и геокриологические условия берегов Гыданской губы (Карское море) // Тр. Десятой международной конференции по мерзлотоведению. — Т. 3. — Салехард, 2012. — С. 365—368.
Oblogov G. E., Streletskaya I. D., Vasiliev A. A. et al. Quaternary deposits and geocryological conditions of Gydan Bay coast of the Kara Sea. Trudy desyatoi mezhdunarodnoi konferentsii po merzlotovedeniyu [Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost]. Vol. 3. Salekhard, 2012, pp. 365—368. (In Russian).

8. Стрелецкая И. Д., Гусев Е. А., Васильев А. А. и др. Подземные льды в четвертичных отложениях побережья Карского моря как отражение палеогеографических условий конца неоплейстоцена-голоцена // Бюл. комиссии по изучению четвертич. периода. — 2012. — № 72. — С. 29—58.

Streletskaya I. D., Gusev E. A., Vasiliev A. A. et al. Ground ice in the Quaternary deposits of Kara Sea coast as

- a proxy of palaeogeography on last Pleistocene-Holocene. Byulleten' komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda [Bull. of the Commission for the Study of the Quaternary Period], 2012, no. 72, pp. 29–58. (In Russian).
9. Чижова Ю. Н., Бабкин Е. М., Хомутов А. В. Изотопный состав кислорода и водорода повторно-жильных льдов Центрального Ямала // Лед и Снег. — 2021. — Т. 61. — №1. — С. 137–148. — DOI: 10.31857/S2076673421010077.
- Chizhova Ju. N., Babkin E. M., Khomutov A. V. Isotopic composition of oxygen and hydrogen of ice wedges in Central Yamal. Led i Sneg [Ice and Snow], 2021, vol. 61, no. 1, pp. 137–148. DOI: 10.31857/S2076673421010077. (In Russian).
10. Forman S. L., Ingólfsson Ó., Gataullin V., Manley W., Lokrantz H. Late Quaternary stratigraphy, glacial limits, and paleoenvironments of the Marresale Area, western Yamal Peninsula, Russia. Quaternary Research, 2002, vol. 57, no. 3, pp. 355–370.
11. Forsstrom L., Greve R. Simulation of the Eurasian ice sheet dynamics during the last glaciation. Global and Planetary Change, 2004, vol. 42, no. 1–4, pp. 59–81.
12. Svendsen J. I., Alexanderson H., Astakhov V. I. et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. Quaternary Science Reviews, 2004, vol. 23, no. 11–13, pp. 1229–1271.
13. Svendsen J. I., Krüger L. C., Mangerud J. et al. Glacial and vegetation history of the Polar Ural Mountains in northern Russia during the Last Ice Age, Marine Isotope Stages 5-2. Quaternary Science Reviews, 2014, vol. 92, pp. 409–428.
14. Hughes A. L. C., Gyllencreutz R., Lohne Ø. S. et al. The last Eurasian ice sheets — a chronological database and time-slice reconstruction, DATED-1. Boreas, 2016, vol. 45, no. 1, pp. 1–45.
15. Van der Plicht J., Aerts A., Wijma S., Zonder A. First results from the Groningen AMS facility. Radiocarbon, 1995, vol. 37, no. 2, pp. 657–661.
16. Bronk Ramsey C. OxCal version 4.4.4. Available at: <https://c14.arch.ox.ac.uk>.
17. 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.
18. Vasil'chuk Yu. K., Vasil'chuk A. C., Budantseva N. A. Holocene January paleotemperature of northwestern Siberia reconstructed based on stable isotope ratio of ice wedges. Permafrost and Periglacial Processes, 2023, vol. 34, iss. 1, pp. 142–165. DOI: 10.1002/ppp.2177.
19. Vasil'chuk Yu. K., van der Plicht J., Jungner H. et al. AMS-dating of Late Pleistocene and Holocene syngenetic ice-wedges. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2000, vol. B (172), pp. 637–641.
20. Vasil'chuk Yu. K., Vasil'chuk A. C. Validity of radiocarbon ages of Siberian yedoma. GeoResJ, 2017, vol. 13, pp. 83–95.

Информация об авторах

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

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

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

MEAN JANUARY AIR PALEOTEMPERATURE DURING THE FORMATION OF THE SEYAKHA YEDOMA 30—13 THOUSAND CALIBRATED YEARS AGO

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

Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation)

For citing

Vasil'chuk Yu. K., Budantseva N. A., Vasil'chuk A. K. Mean January air palaeotemperature during the formation of the Seyakha Yedoma 30—13 thousand calibrated years ago. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 2, pp. 164—176. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-164-176. (In Russian).

The article was received on January 16, 2024

Abstract

Study of the yedoma strata with thick syngenetic ice wedges on the eastern coast of the Yamal Peninsula at the mouth of the Seyakha River, including radiocarbon dating of the enclosing sediments and ice wedge ice and determination of isotope composition of ice, showed that between 30 and 13 thousand calibrated years ago, the mean January air temperature was on average 10°C lower than the current one and varied from –35° to –33°C. The accumulation of yedoma strata on the northern plains of Western Siberia is evidence of the glacial cover absence in the area during the last glacial maximum.

Keywords: *ice wedges, Yedoma, Late Pleistocene, north of Western Siberia, radiocarbon age, stable isotopes, mean January paleotemperature.*

Funding

This research was supported by the Russian Scientific Foundation (grant no. 23-17-00082).

Information about the authors

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

Budantseva, Nadine Arkad'evna, PhD in Geography, Senior Scientific Researcher, Department of Landscape Geochemistry and Soil Science, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (GSP-1, Leninskiye Gory, 1, Moscow, Russia, 119991), e-mail: nadin.budanceva@mail.ru.

Vasil'chuk, Alla Konstantinovna, Doctor of Geography, Leading Scientific Researcher, Laboratory of Geocolony of the North, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (GSP-1, Leninskiye Gory, 1, Moscow, Russia, 119991), e-mail: alla-vasilch@yandex.ru.

© Vasil'chuk Yu. K., Budantseva N. A., Vasil'chuk A. K., 2024