

УДК 551.435.536

РАДИОУГЛЕРОДНЫЙ ВОЗРАСТ И СТАБИЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ КИСЛОРОДА В ГОЛОЦЕНОВЫХ ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДАХ НА ПОБЕРЕЖЬЕ БАЙДАРАЦКОЙ ГУБЫ: РЕКОНСТРУКЦИЯ ЯНВАРСКОЙ ПАЛЕОТЕМПЕРАТУРЫ

© 2023 г. Ю. К. Васильчук^{1,*}, Н. А. Буданцева¹, И. В. Токарев², А. П. Гинзбург¹,
А. К. Васильчук¹, Дж. Ю. Васильчук¹

Представлено академиком Н.С. Касимовым 15.07.2023 г.

Поступило 10.07.2023 г.

После доработки 17.08.2023 г.

Принято к публикации 30.08.2023 г.

С помощью ускорительной масс-спектрометрии (AMS) впервые для Европейского севера России выполнено датирование микровключений органического материала, экстрагированного непосредственно из голоценовых сингенетических повторно-жильных льдов, вскрытых в обнажении на побережье Байдарацкой губы близ пос. Яринская, в 500 м к ЮВ от устья реки Нгарки-Тамбяхи (68°51'20.27" с.ш., 66°52'6.51" в.д.). Датированные жилы формировались около 6.4, 5.0 и 1.9 тыс. калибр. лет назад. По изотопно-кислородным данным рассчитана среднеянварская палеотемпература воздуха среднего и позднего голоцена на побережье Байдарацкой губы. Показано, что среднеянварская температура воздуха в этот период здесь варьировала приблизительно от –20 до –25°C, однако во время более мягких зим она могла быть и около –18°C.

Ключевые слова: повторно-жильные льды, голоцен, AMS-радиоуглеродное датирование, стабильные изотопы кислорода, январская палеотемпература, побережье Байдарацкой губы

DOI: 10.31857/S2686739723601564, **EDN:** XIBMEQ

В западном секторе Российской криолитозоны детально изучено очень немного ледяных жил, которые могли бы служить источником достоверной палеогеографической и изотопно-палеотемпературной информации [1–5]. В связи с этим полученные с помощью ускорительной масс-спектрометрии (AMS) впервые для Европейского севера России новые радиоуглеродные датировки и изотопные данные по голоценовым повторно-жильным льдам на побережье Байдарацкой губы весьма актуальны.

Основная цель данной работы — установить время формирования голоценового сингенетического повторно-жильного льда, вскрывшегося на побережье Байдарацкой губы близ пос. Яринская, в 500 м к ЮВ от устья реки Нгарки-Тамбяхи (68°51'20.27" с.ш., 66°52'6.51" в.д.) и с использованием изотопно-кислородных данных установить

приблизительную среднеянварскую (среднефевральскую) палеотемпературу в этот период. Для решения поставленной задачи впервые для Европейского Севера выполнено определение возраста голоценового повторно-жильного льда, по микровключениям органического материала, представленного органической пылью — осевшими почвенными и биогенными аэрозолями, органическими пылевидными частицами из микровключений органики, экстрагированных из повторно-жильных льдов, датированного с помощью ускорительной масс-спектрометрии (AMS) и подробно изучены изотопно-кислородный состав 6 ледяных жил.

Изученный разрез в обнажении первой морской террасы (абс. высота 4–9 м) располагается вдоль узкого участка Уральского берега Байдарацкой губы в 500 м к ЮВ от устья реки Нгарки-Тамбяхи (68°51'20.27" с.ш., 66°52'6.51" в.д.).

Для западного побережья Байдарацкой губы характерен субарктический тип климата. Наиболее теплым месяцем здесь является июль (среднемесячная температура воздуха +8.3°C), самым холодным — февраль (–20.6°C). [6]. Мощность мерзлых пород колеблется от 8 до 25 м и более [7]. Геокриологический разрез представляет собой

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

²Научный парк, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: vasilch_geo@mail.ru



Рис. 1. Голоценовые повторно-жильные льды в отложениях лайды на западном побережье Байдарацкой губы, в устье реки Нгарка-Тамбяха.

чередование мерзлых пород с охлажденными [8]. По информации из базы данных GTNP [9], в районе исследований среднегодовая температура пород на глубине нулевых колебаний составляет от -4.8°C до -3.7°C . На юго-западном побережье Байдарацкой губы широко развиты морозобойное растрескивание и образование повторно-жильных льдов.

Образцы льда отбирались из ледяных жил по вертикали через каждые 10 см с помощью дрелей Makita DDF481rte 18B и Bosch GSR 36 VE-2-LI со стальными коронками для льда диаметром 51 мм. Радиоуглеродное датирование образцов, микровключений органического материала, экстрагированного непосредственно из ледяных жил проведено в ЦКП “Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии” Института географии РАН и Центре прикладных изотопных исследований Университета Джорджии (США). Измерения изотопного состава кислорода и водорода льда выполнены на лазерном инфракрасном спектрометре Picarro L 2130-i в Ресурсном центре “Рентгенодифракционные методы исследования” Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета. Использованы следующие международные стандарты: V-SMOW-2, GISP, SLAP, USGS-45 и USGS-46. Погрешность определений составила: для $\delta^{18}\text{O}$ — $\pm 0.02\text{‰}$, для $\delta^2\text{H}$ — $\pm 0.3\text{‰}$. Всего проанализировано 63 пробы повторно-жильных льдов.

Голоценовые повторно-жильные льды (ПЖЛ) вскрыты на лайде побережья Байдарацкой губы невысоким обнажением высотой до 1–1.5 м. На исследованном участке лайды развита поли-

гонально-валиковая и выпукло-полигональная сеть, форма полигонов изометричная, их размеры варьируют от 40×25 м до 7×10 м, а в поперечнике достигают 30 м. Опробование голоценовых ледяных жил выполнено из толщи озерных суглинков, перекрытых торфом мощностью 0.3–0.6 м. Торф горизонтально-слоистый с прослоями тонкого песка с массивной, реже базальной криотекстурой. Торф подстилается суглинками серыми сильнольдистыми со слоисто-линзовидной криогенной текстурой. Повторно-жильные льды шириной 1.2–1.5 м залегают на глубине 0.5–0.6 м (рис. 1), вскрыто 6 ледяных жил высотой 0.5–1 м. Состав грунтовых включений во льду варьирует от тяжелого суглинка к глине, с микровключениями органического материала. Отбор образцов выполнен по сетке по всей вскрытой части жил.

Повторно-жильные льды ультрапресные, общая минерализация жил, измеренная в поле с помощью TDS-метра, находится в пределах от 16.5 до 36.9 мг/л.

Изотопный состав кислорода в изученных повторно-жильных льдах заметно различается (рис. 2, табл. 1). Наиболее высокие средние значения $\delta^{18}\text{O}$ получены в ПЖЛ-5 — -12.51‰ , наиболее низкие в ПЖЛ-8 — -18.40‰ , разница составила 5.89‰ . Значения $\delta^{18}\text{O}$ в повторно-жильных льдах с визуально выраженными включениями серого глинистого грунта несколько тяжелее — от -11.30‰ в ПЖЛ-1 до -13.73‰ в ПЖЛ-6 и до -12.17‰ в ПЖЛ-5. Наиболее минерализованные ледяные жилы, в которых общее количество растворенных в воде частиц составляет 29.4 и 36.9 мг/л, являются и наиболее изотопно-тяжелыми — в них значения $\delta^{18}\text{O}$ составляют -11.30 и -12.49‰ , что ука-

Таблица 1. Результаты измерений значений $\delta^{18}\text{O}$ в образцах повторно-жильных льдов близ п. Яры в устье реки Игарка-Тамбяха

Число образцов	$\delta^{18}\text{O}$, ‰			Число образцов	$\delta^{18}\text{O}$, ‰		
	Мин.	Сред.	Макс.		Мин.	Сред.	Макс.
11	–18.30	–16.10	–11.30	6	–16.01	–12.51	–11.07
11	–19.43	–15.72	–13.39	7	–18.37	–15.95	–13.73
16	–21.82	–18.40	–13.73	5	–17.83	–17.44	–16.99
12	–19.87	–17.96	–16.97				

Таблица 2. Результаты радиоуглеродного датирования образцов повторно-жильных льдов близ п. Яры в устье реки Нгарка-Тамбяха*

Полевой номер образца	Глубина, м	IGAN _{AMS}	AMS ^{14}C даты, лет назад (1 σ)	Калиброванный возраст, лет, вероятность 95.4%	
				В интервале	Медианный
Яры-29 (ПЖЛ-3)	1.04	10443	5640 $\pm$ 20	6489–6320	6422
Яры-45 (ПЖЛ-4)	0.94	10444	4400 $\pm$ 20	5042–4873	4958
Яры- 69 (ПЖЛ-7)	0.73	10445	1945 $\pm$ 20	1939–1821	1869

* Калиброванный возраст получен с использованием калибровочной кривой IntCal20 [14] и программы Oxcal version 4.4.4 [15]. Возраст органики из повторно-жильного льда калиброван в календарных годах до настоящего времени (до 1950 г.)

зывает или на примесь вод сезонно-талого слоя в жилах, или на микропримеси морских аэрозолей в повторно-жильных льдах. Отметим, что по ранее исследованным голоценовым повторно-жильным льдам в близлежащих районах такие высокие значения не были зафиксированы ни разу, и вновь полученные экстремально высокие изотопные данные требуют дальнейшего изучения.

Соотношение значений $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в голоценовых повторно-жильных льдах на побережье Бай-дарацкой губы (рис. 3) близко к глобальной линии атмосферных (метеорных) вод (ГЛМВ) и описывается уравнением $\delta^2\text{H} = 7.5\delta^{18}\text{O} + 2.1$. Соотношения значений $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в ранее исследованных голоценовых повторно-жильных льдах в районе г. Воркуты $\delta^2\text{H} = 7.68\delta^{18}\text{O} + 6.55$ [3], на п-овах Ямал и Гыданский $\delta^2\text{H} = 7.4\delta^{18}\text{O} - 0.3$ [4], в современных осадках в Амдерме $\delta^2\text{H} = 7.62\delta^{18}\text{O} + 6.86$ и Салехарде $\delta^2\text{H} = 7.66\delta^{18}\text{O} + 1.21$ [3] также близки к ГЛМВ.

Радиоуглеродное датирование микровключений органического материала, экстрагированного непосредственно из 3 голоценовых сингенетических повторно-жильных льдов, выполнено с помощью ускорительной масс-спектрометрии

(AMS). Датированные жилы формировались около 6.4, 5.0 и 1.9 тыс. калибр. лет назад (табл. 2).

Реконструкция приблизительной среднеянварской (среднефевральской) температуры воздуха в разные периоды голоцена выполнена на основе изотопных данных. Сопоставление изотопно-кислородного состава льда голоценовых жил (в которых значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют в основном от –21.8 до –13.73‰) и современных жилок (возраст которых, как правило, не более 100 лет) показывает близкий диапазон вариаций значений: во льду ростков ПЖЛ устье р. Нгарка-Тамбяха значение $\delta^{18}\text{O}$ составило от –21.82 до –14.11‰ [1], по ростку в районе пос. Амдерма ранее получено значение $\delta^{18}\text{O} = -15.2‰$ [10], два значения $\delta^{18}\text{O}$ в жильных ростках из торфа на мысе Шпиндлера оказались равны –13.1‰ и –16.9‰ [11], по жильному ростку в районе Воркуты получено значение $\delta^{18}\text{O} = -16.0‰$ [3]. По данным метеостанций Воркута, Амдерма и Усть-Кара современная среднезимняя температура воздуха (средняя за период с ноября по март) в районе исследований по данным на 1965 г. составляет от –14 до –18°C [12]. Для изученного района отмечена прямая корреляция среднезимней (от –14 до –18°C) и среднеянварской (от –20 до –25°C) температуры

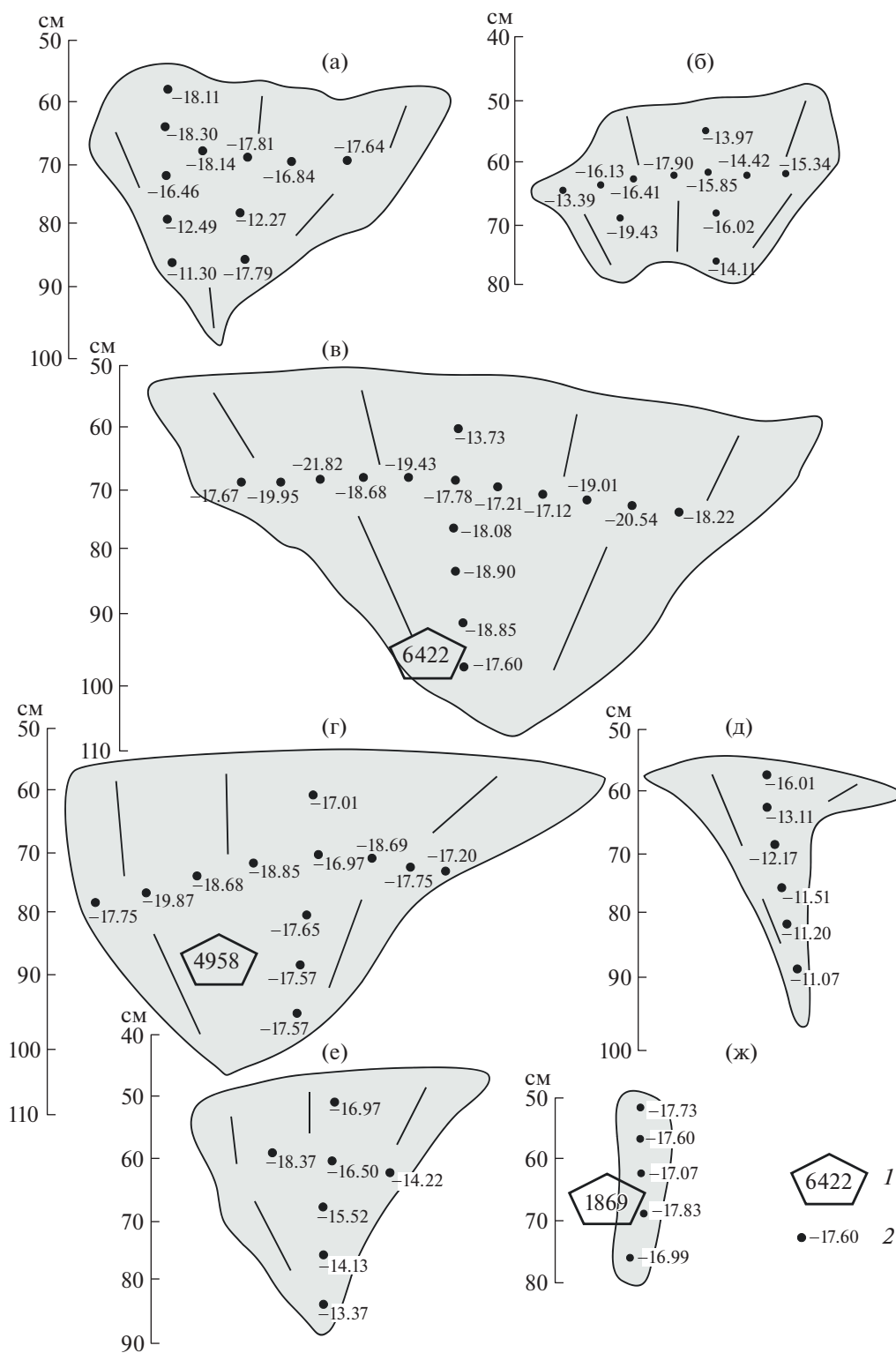


Рис. 2. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в голоценовых повторно-жильных льдах и в смешанных сегрегационных и повторно-жильных льдах с включениями серого глинистого грунта на западном побережье Байдарацкой губы, в устье реки Нгарка-Тамбьяха: а – ПЖЛ-1; б – ПЖЛ-2; в – ПЖЛ-3; г – ПЖЛ-4; д – ПЖЛ-6; ж – ПЖЛ-7. 1 – AMS радиоуглеродный возраст; 2 – значение $\delta^{18}\text{O}$.

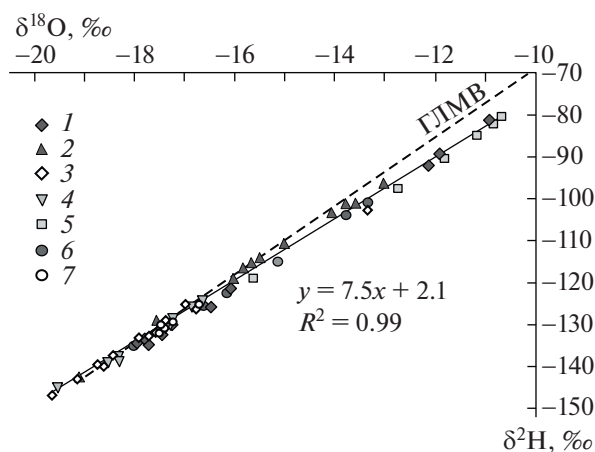


Рис. 3. Соотношение значений $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в голоценовых повторно-жильных льдах на побережье Байдарцкой губы. 1 – ПЖЛ-1; 2 – ПЖЛ-2; 3 – ПЖЛ-3; 4 – ПЖЛ-4; 5 – ПЖЛ-6; 6 – ПЖЛ-6; 7 – ПЖЛ-7.

воздуха и параметра $\delta^{18}\text{O}$ современных жильных ростков (от -13 до -19‰) с отклонением $\pm 2-3^\circ\text{C}$.

Применяя приближенную зависимость изотопно-кислородного состава повторно-жильного льда жил от среднеянварских температур воздуха, предложенную Ю.К. Васильчуком [13], можно сделать вывод, что вариации среднеянварской температуры воздуха в период формирования повторно-жильных льдов в исследуемом районе составляли приблизительно от -20 до -25°C , однако во время более мягких зим среднеянварская температура воздуха могла быть и около -18°C .

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят за помощь в проведении полевых работ В.С. Исаева, И.А. Агапкина, Р.М. Аманжурова, Е.И. Горшкова, Р.В. Собина.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда (грант № 23-17-00082 – криостратиграфические, почвенные и геохимические исследования). Изотопные измерения выполнены в Ресурсном центре “Рентгенодифракционные методы исследования” Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета в рамках программы ГЗ № АААА-А19-119091190094-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буданцева Н.А., Белова Н.Г., Васильчук А.К., Васильчук Ю.К. Стабильные изотопы кислорода и водорода в голоценовых повторно-жильных льдах на западном побережье Байдарцкой губы, в устье ре-

ки Нгарка-Тамбьяха // Арктика и Антарктика. 2018. № 1. С. 44–65.
<https://doi.org/10.7256/2453-8922.0.0.25857>

2. Романенко Ф.А., Андреев А.А., Сулержицкий Л.Д., Тарасов П.Е., Воскресенский К.С., Николаев В.И. Особенности формирования рельефа и рыхлых отложений западного Ямала и побережья Байдарцкой губы (Карское море) // Проблемы общей и прикладной геоэкологии Севера. М.: МГУ, 2001. С. 41–68.
3. Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Chizhova Ju.N. Winter air temperature during the Holocene optimum in the north-eastern part of the east European plain based on ice wedge stable isotope records // Permafrost and Periglacial Processes. 2020. V. 31. Iss.2. P. 281–295.
<https://doi.org/10.1002/ppp.2043>
4. 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. V. 34. Iss. 1. P. 142–165.
<https://doi.org/10.1002/ppp.2177>
5. Tikhonravova Y., Slagoda E., Butakov V., Koroleva E., Simonova G., Sysolyatin R. Isotopic composition of heterogeneous ice wedges in peatlands of the Pur-Taz interfluvial (northern West Siberia) // Permafrost and Periglacial Processes. 2022. V. 33. Iss. 2. P. 114–128.
<https://doi.org/10.1002/ppp.2138>
6. Природные условия Байдарцкой губы: Основные результаты исследований для строительства подводящего перехода системы магистральных газопроводов Ямал-Центр. / Баулин В.В., Дубиков Г.И., Комаров И.А., Корейша М.М., Пармузин С.Ю. и др. М.: ГЕОС. 1997. 432 с.
7. Isaev V.S., Koshurnikov A.V., Pogorelov A., et al. Cliff retreat of permafrost coast in south-west Baydaratskaya Bay, Kara Sea, during 2005–2016 // Permafrost and Periglacial Processes. 2019. V. 30. P. 35–47.
<https://doi.org/10.1002/ppp.1993>
8. Алексютин Д.М., Мотенко Р.Г. Состав, строение и свойства мерзлых и талых отложений побережья Байдарцкой губы Карского моря // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 1. С. 13–25.
[https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-1\(13-25\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-1(13-25))
9. Global Terrestrial Network on Permafrost <http://gtnp-database.org/>
10. Коняхин М.А., Михалев Д.В., Соломатин В.И. Изотопно-кислородный состав подземных льдов. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1996. 156 с.
11. Leibman M.O., Lein A.Yu., Hubberten H.-W., Vanshtein B.G., Goncharov G.N. Isotope-geochemical characteristics of tabular ground ice at Yugorsky Peninsula and reconstruction of conditions for its formation // Data of Glaciological Studies (Materialy Glatsiologicheskikh issledovaniy). Iss. 90. 2001. P. 30–39.
12. Справочник по климату СССР. Выпуск 1. Архангельская и Вологодская области. Карельская и Коми АССР. Часть II. Температура воздуха и почвы.

- Гидрометеорологическое издательство. Ленинград, 1965. 360 с.
13. *Vasil'chuk Yu.K.* Reconstruction of the paleoclimate of the Late Pleistocene and Holocene of the basis of isotope studies of subsurface ice and waters of the permafrost zone // *Water Resources*. Published by Consultants Bureau. New York. 1990. V. 17. № 6. P. 640–647.
14. *Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E., Bayliss A., et al.* The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal ka BP) // *Radiocarbon*. 2020. V. 62 (4). P. 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
15. *Bronk Ramsey C.* 2021. OxCal version 4.4.4. Available at: <https://c14.arch.ox.ac.uk> (accessed 12 April 2022)

RADIOCARBON AGE AND STABLE OXYGEN ISOTOPES IN HOLOCENE ICE WEDGES ON THE COAST OF THE BAYDARATA BAY: RECONSTRUCTION OF THE JANUARY PALEOTEMPERATURE

**Yu. K. Vasil'chuk^{a, #}, N. A. Budantseva^a, I. V. Tokarev^b, A. P. Ginzburg^a,
A. C. Vasil'chuk^a, and J. Yu. Vasil'chuk^a**

^a*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russian Federation*

^b*Science Park, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russian Federation*

[#]*E-mail: vasilch_geo@mail.ru*

Presented by Academician of the RAS N.S. Kasimov June 15, 2023

For the first time AMS radiocarbon dating was used to date microinclusions of organic material extracted directly from Holocene syngenetic ice wedges in the European North of Russia on the coast of the Baydarata Bay near the Yarynskaya village, 500 m south of the mouth of the Ngarka-Tambyakha River (68°51'20.27" N, 66°52'6.51" E). Dated ice wedges formed about 6.4, 5.0 and 1.9 ka BP. According to isotope oxygen data, the average January air paleotemperature in the Middle and Late Holocene at the coast of the Baydarata Bay was calculated. It is shown that the average January air temperature during this period here varied from about –20 to –25°C, however, during milder winters it could be about –18°C.

Keywords: ice wedges, Holocene, AMS radiocarbon dating, stable oxygen isotopes, January paleotemperature, coast of Baydarata Bay