

УДК

## ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИЕ ИЗОТОПНО-КИСЛОРОДНАЯ И ДЕЙТЕРИЕВАЯ ДИАГРАММЫ В ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДАХ БАТАГАЙСКОЙ ЕДОМЫ, СЕВЕР ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Ю. К. Васильчук\*, Дж. Ю. Васильчук, Н. А. Буданцева,  
А. К. Васильчук, А. Ю. Тришин

Представлено академиком РАН А. П. Лисицыным 13.11.2017 г.

Поступило 21.12.2017 г.

Основная задача данной работы — исследование изотопно-кислородного и дейтериевого составов плейстоценовых сингенетических повторно-жильных льдов и получение высокоразрешающей изотопной диаграммы из детально отобранного разреза Батагайской едомы. Реконструированная по жилам палеотемпература января — ниже  $-51\text{ }^{\circ}\text{C}$  — в полной мере подтвердила достоверность ранее составленных палеотемпературных карт, на которых Батагай находится внутри изолинии  $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$  на карте палеорекострукции для периода 30–25 тыс. лет назад.

*Ключевые слова:* повторно-жильные льды, едома, стабильные изотопы, палеотемпература.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524876674-678>

Мощные сингенетические повторно-жильные льды обычно встречаются в едомных толщах в долинах рек, на побережьях морей и озёр [1–3]; в горных и предгорных районах они изучены гораздо меньше — мощные позднеплейстоценовые сингенетические жилы встречены в пределах речных долин Восточного Саяна [4], в котловинах Верхнеколымского нагорья [5]. Поэтому Батагайский мегапровал, расположенный в 10 км юго-восточнее пос. Батагай ( $67^{\circ}34'49''$  с.ш.,  $134^{\circ}46'19''$  в.д.), в Верхоянском улусе, Республики Якутия (Саха), на склоне холма между горой Киргиллях и горой Хатыннах, представляет исключительный интерес [6–8] (рис. 1).

Основная задача данной работы — исследование изотопно-кислородного и изотопно-водородного (дейтериевого) состава в плейстоценовых сингенетических повторно-жильных льдах детально исследованного разреза Батагайской едомы и получение высокоразрешающих изотопных диаграмм.

В 60-х годах XX в. близ пос. Батагай был обнаружен овраг шириной 1,5 м, глубина составляла 5 м. С 1990-х годов небольшой овраг начал заметно увеличиваться. Сейчас его размеры достигли: глубина 70–100 м, длина и ширина более 1 км.

Климат по данным метеостанции Батагай близок к умеренно-холодному. Среднегодовая температура

воздуха  $-14,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Наиболее холодный месяц — январь с температурами от  $-43$  до  $-51\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Современная среднеянварская температура воздуха в пос. Батагай  $-45,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  [9]. Растительность окружающей овраг территории северо-таёжного и лесотундрового типов, представленная лиственницей, берёзой, берёзкой карликовой, кедровым стлаником, багульником, ольхой и др.

Батагайское обнажение представляет собой отвесную стенку высотой от 50 до 85 м. С поверхности до глубины 75 м залегают сильнольdistые едомные отложения. В самой западной части обнажения едомная толща разделена на два слоя: верхний мощностью 30–45 м и нижний — около 30 м. Верхний слой вмещает узкие ледяные жилы шириной не более 1,5–2 м (из этого фрагмента разреза с глубины

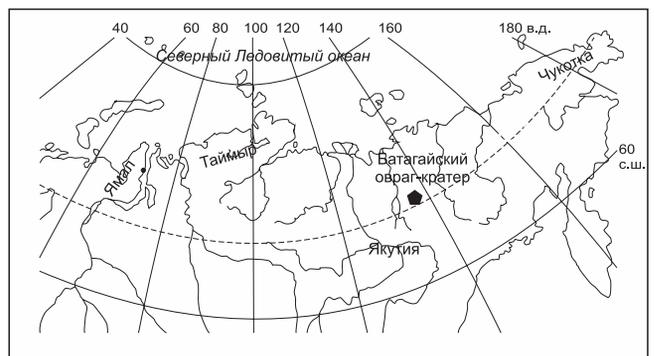
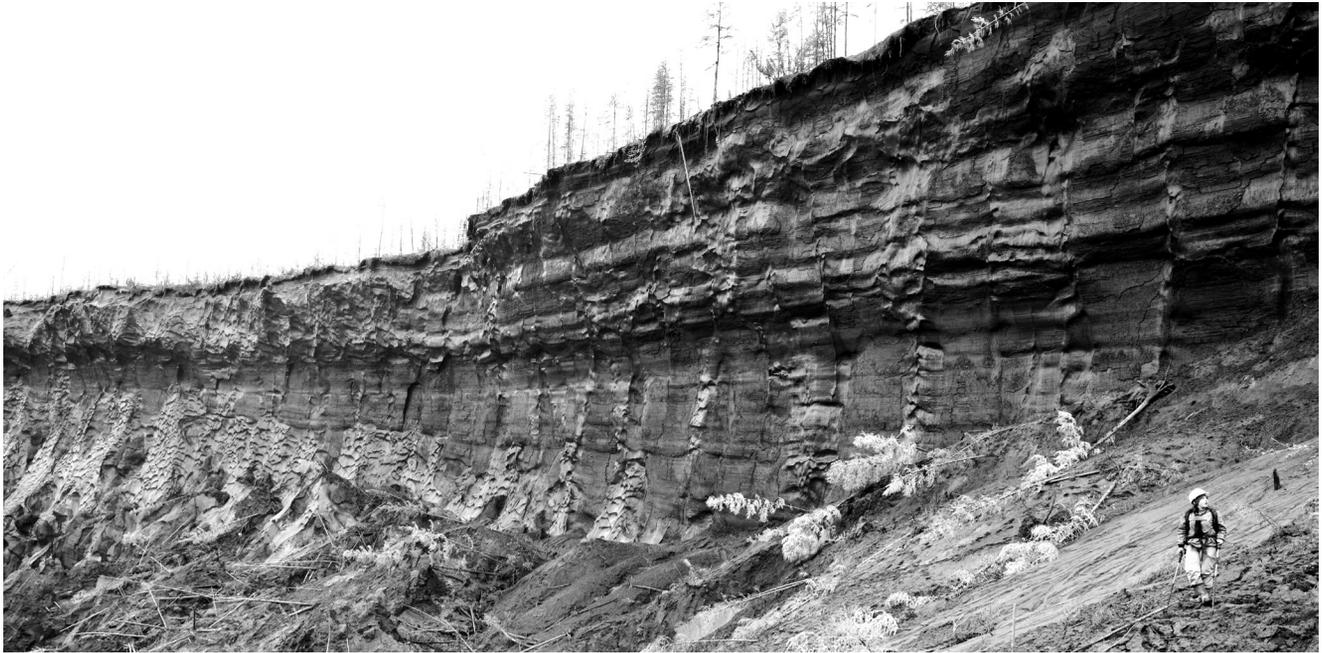


Рис. 1. Местоположение Батагайской едомной толщи с мощными позднеплейстоценовыми сингенетическими повторно-жильными льдами.

Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова

\*E-mail: [vasilch\\_geo@mail.ru](mailto:vasilch_geo@mail.ru)



**Рис. 2.** Батагайская едомная толща с мощными позднеплейстоценовыми сингенетическими повторно-жильными льдами. Фото Ю.К. Васильчука.

5–10 м, или 315–320 м абс. высоты, детально опробован повторно-жильный лёд — ПЖЛ № 3) (рис. 2).

Головы ледяных жил залегают на глубине 3–4 м (в некоторых местах они залегают практически у поверхности). Лёд ледяных жил чётко вертикально слоистый, насыщен грунтовыми супесчаными частицами шириной до 1–2 см. Разделяющие жилы полигоны небольшие — в ширину редко превышают 4–5 м и, как правило, составляют 1,5–3 м (но в западной части обнажения полигоны больше — до 10 м). В западном секторе обнажения в верхней части едомной толщи фациальный перьеобразный контакт с озёрной или таберальной толщей (практически без льда), в виде горизонтального клина длиной около 150–200 м внедряется в едомную толщу и сверху его перекрывает, а снизу подстилает едомная толща (из нижней части едомной толщи с глубины 65–73 м, или 252–260 м абс. высоты, также детально опробован повторно-жильный лёд — ПЖЛ № 2). В этой нижней части ледяные жилы желтовато-серые, косовертикально-слоистые, практически без включений грунта, тогда как в остальной части они преимущественно серого цвета. Что касается размеров ледяных жил в едомной толще, в целом можно отметить тенденцию к утолщению ледяных жил в сторону западной и нижней части едомного массива.

Едомные толщи в самой нижней части разреза подстилаются горизонтально-слоистой толщей суглинков, которая, возможно, представляет собой

древние таберальные отложения. Толща содержит более 20 горизонтальных слоёв, внизу более часто слоистых, в средней части выраженный горизонтальный тёмный слой, здесь слоистость реже, в кровле этой горизонтально-слоистой толщи наблюдается частое переслаивание за счёт большего содержания органики.

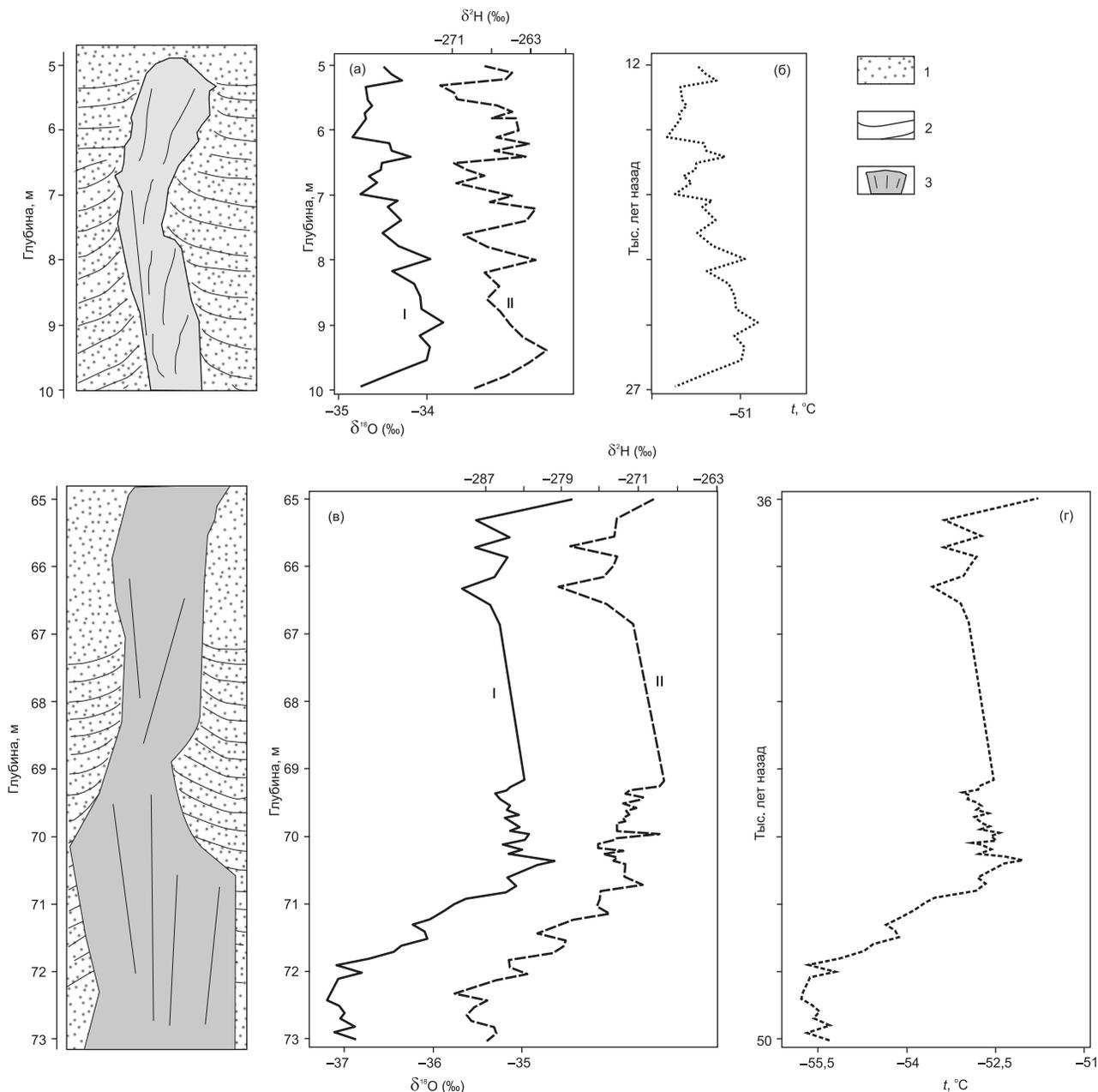
Измерения изотопного состава кислорода и водорода льда выполнены в режиме постоянного потока гелия (CF-IRMS) на масс-спектрометре Delta-V с использованием комплекса газ-бенч в изотопной лаборатории географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Для калибровки измерений использовались международные стандарты V-SMOW, SLAP, собственный лабораторный стандарт МГУ — снег ледника Гарабаши ( $\delta^{18}\text{O} = -15,60\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H} = -110,0\text{‰}$ ). Погрешность определений составила  $\pm 0,6\text{‰}$  для  $\delta^2\text{H}$  и  $\pm 0,1\text{‰}$  для  $\delta^{18}\text{O}$ .

В повторно-жильном льду № 2 (ПЖЛ № 2) колебания значений  $\delta^{18}\text{O}$  составляют 2,6‰ (табл. 1), в весьма отрицательном диапазоне (от  $-37,2$  до  $-34,51\text{‰}$ ), а вариации значений  $\delta^2\text{H}$  23‰ (от  $-290,8$  до  $-267,8\text{‰}$ ). Это, по сути, самые низкие изотопные характеристики, полученные для едомных толщ Сибири. В самом молодом повторно-жильном льду № 3 (ПЖЛ № 3), вскрытом в самой верхней части Батагайской едомы, вариации значений  $\delta^{18}\text{O}$  составляют всего около 1‰ (от  $-34,83$  до  $-33,8\text{‰}$ ), а изменение значений  $\delta^2\text{H}$  составило 9‰ (от  $-272,6$  до  $-263,6\text{‰}$ ).

**Таблица 1.** Значения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  в повторно-жильных льдах Батагайской едомы, ‰

Кол-во образцов	$\delta^{18}\text{O}$			$\delta^2\text{H}$		
	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.
ПЖЛ № 1. Глубина 68–70 м (255–257 м н.у.м.)						
8	–34,86	–34,4	–32,67	–270,2	–265,0	–247,1
ПЖЛ № 2. Глубина 65–73 м (252–260 м н.у.м.)						
59	–37,2	–35,69	–34,51	–290,8	–276,3	–267,8
ПЖЛ № 3. Глубина 5–10 м (315–320 м н.у.м.)						
38	–34,83	–34,23	–33,8	–272,6	–266,8	–261,8

Средние значения изотопных соотношений в ПЖЛ № 3: величина  $\delta^{18}\text{O}$  составляет  $-34,41\text{‰}$ , значение  $\delta^2\text{H}$   $-266,8\text{‰}$ , в ПЖЛ № 2 они наиболее низкие — средняя величина  $\delta^{18}\text{O}$  составляет  $-35,69\text{‰}$ , а значение  $\delta^2\text{H}$   $-276,3\text{‰}$ . В очень узкой — менее 0,5 м в ширину ПЖЛ № 4, вскрытой в озёрной (таберальной) вкладке на глубине 21 м, величина  $\delta^{18}\text{O}$  составила около  $-33\text{‰}$ , а значение  $\delta^2\text{H}$  около  $-240\text{‰}$ . В текстурных льдах из подстилающих горизонтально-слоистых толщ суглинков (древние



**Рис. 3.** Изотопно-кислородная (I) и дейтериевая (II) диаграммы сингенетических повторно-жильных льдов верхнего (а) и нижнего (в) ярусов в Батагайской едомной толще и высокоразрешающие палеотемпературные кривые для периода приблизительно 26–12 тыс. лет назад (б) и 50–36 тыс. лет назад (г): 1 — едомные отложения — супеси; 2 — повторно-жильный лёд; 3 — шпирь текстурного льда.

таберальные отложения) величины  $\delta^{18}\text{O}$  варьируются между  $-32,5$  и  $-33,95\%$ , а значения  $\delta^2\text{H}$  изменяются от  $227$  до  $-241\%$ , тогда как в текстурном льду из едомы величина  $\delta^{18}\text{O}$  равна  $-35,84\%$ , а значение  $\delta^2\text{H}$  около  $-274,7\%$ .

В воде из р. Батагайки получено значение  $\delta^{18}\text{O}$ , равное  $-19,81\%$ , а величина  $\delta^2\text{H}$   $-149,8\%$ , а в воде р. Яны  $-21,14$  и  $-158,9\%$  соответственно. Ранее по росткам ледяных жил на пойме р. Яны М.А. Коныхиним получены два значения  $\delta^{18}\text{O}$ : в  $100$  км от устья р. Яны  $-27,0\%$  и в  $160$  км от устья р. Яны  $-29,0\%$  [10].

Приведём наиболее достоверные, по нашему мнению,  $^{14}\text{C}$ -датировки, полученные Дж. Мёртоном [7] и К. Ашастиной с соавторами [8], в тыс. лет:  $12\,660 \pm 50$  (Poz-79756) с глубины  $8,5$  м,  $36\,300 \pm 700$  (Poz-75782) с глубины  $18,5$  м и  $49\,320 \pm 3150$  (МАГ-2047) с глубины  $47$  м [7, 8]. Опираясь на них, можно пока с большой долей осторожности предполагать (с учётом возможного переотложения древнего материала, обычного для едомных толщ [11]), что едомная толща, вмещающая верхнюю исследованную жилу — ПЖЛ № 3, формировалась примерно в период от  $27$  до  $12$  тыс. лет назад, а нижняя — вмещающая нижнюю исследованную жилу — ПЖЛ № 2, примерно от  $50$  до  $36$  тыс. лет назад.

Реконструированные по вариациям  $\delta^{18}\text{O}$  в повторно-жильных льдах палеотемпературы воздуха: среднезимняя от  $-34$  до  $-36$  °С, среднеянварская от  $-51$  до  $-55$  °С; это самые низкие зимние температуры, полученные Ю.К. Васильчуком [12, с. 26] для позднеплейстоценового криохрона на территории Российской криолитозоны: в Куларе, Зелёном Мысу и Дуванном Яре реконструирована среднеянварская палеотемпература воздуха  $-48$  °С, а в разрезе Плахинского Яра  $-49$  °С [13]. Пожалуй, только в нижней части разреза Иткилик на Аляске зафиксированы [14] низкие изотопные значения, сопоставимые с Батагайскими, — там также  $\delta^{18}\text{O}$  немного ниже  $-35\%$ .

Изотопно-кислородные диаграммы, составленные по данным из детально отобранных ПЖЛ № 3 (рис. 3а) и ПЖЛ № 2 (рис. 3б), позволили реконструировать ход среднеянварских температур воздуха и выстроить их в хронологической последовательности на диаграммах (рис. 3в, г).

Можно ещё отметить, что на картах распределения январских палеотемператур воздуха на севере Евразийской криолитозоны, составленных для позднего плейстоцена Ю.К. Васильчуком в 1992 г. [12, с. 261], Батагай находится внутри изолинии  $-48$  °С на карте палеорекострукции для периода

$30$ – $25$  тыс. лет назад и внутри изолинии  $-44$  °С на карте для периода  $22$ – $14$  тыс. лет. Материалы по изотопному составу повторно-жильных льдов Батагайки и реконструированная по ним палеотемпература января ниже  $-51$  °С в полной мере подтвердили достоверность этих карт.

**Источники финансирования.** При финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14–27–00083-П) выполнены полевые исследования, РФФИ по проекту 17–05–00793 — изотопные определения, по проекту 17–05–00794 — палеотемпературные реконструкции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильчук Ю.К. Повторно-жильные льды; гетероцикличность, гетерохронность, гетерогенность. М.: Изд-во МГУ, 2006. 404 с.
2. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C. Radiocarbon Dating and Oxygen Isotope Variations in Late Pleistocene Syngenetic Ice-Wedges, Northern Siberia // Permafrost and Periglacial Processes. 1997. V. 8. Iss. 3. P. 335–345.
3. Kanevskiy M., Shur Y., Fortier D., Jorgenson M.T., Stephani E. Cryostratigraphy of Late Pleistocene Syngenetic Permafrost (Yedoma) in Northern Alaska, Itkilik River Exposure // Quatern. Res. 2011. V. 75. Iss. 3. P. 584–596.
4. Осадчий С.С. Повторно-жильные льды в Восточном Саяне и их стратиграфическое значение. В кн.: Поздний плейстоцен и голоцен юга Восточной Сибири. Новосибирск: Наука, 1982. С. 146–155.
5. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C. Oxygen-Isotope and  $^{14}\text{C}$  Data Associated with Late Pleistocene Syngenetic Ice-Wedges in Mountains of Magadan Region, Siberia // Permafrost and Periglacial Processes. 1998. V. 9. Iss. 2. P. 177–183.
6. Куницкий В.В., Сыромятников И.И., Ширрмайстер Л., Скачков Ю.Б., Гроссе Г., Веттерих С., Григорьев М.Н. Ледистые породы и термоденудация в районе поселка Батагай (Янское нагорье, Восточная Сибирь) // Криосфера Земли. 2013. Т. 17. № 1. С. 56–68.
7. Murton Ju. B., Edwards M.E., Lozhkin A.V., Anderson P.M., Savvinov G.N., Bakulina N., Bondarenko O.V., Cherepanova M.V., Danilov P.P., Boeskorov V., Goslar T., Grigoriev S., Gubin S.V., Korzun Ju.A., Lupachev A.V., Tikhonov A., Tsygankova V.I., Vasilieva G.V., Zanina O.G. Preliminary Paleoenvironmental Analysis of Permafrost Deposits at Batagaika Megaslump, Yana Uplands, Northeast Siberia // Quatern. Res. 2017. V. 87. P. 314–330.
8. Ashastina K., Schirrmeyer L., Fuchs M., Kienast F. Palaeoclimate Characteristics in Interior Siberia of MIS6-2: First Insights from the Batagaik Permafrost

- Mega-Thaw Slump in the Yana Highlands // *Climate Past*. 2017. V. 13. P. 795–818.
9. Справочник по климату СССР. В. 24. Якутская АССР. Ч. 2. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 403 с.
  10. *Коняхин М.А., Михалев Д.В., Соломатин В.И.* Изотопный состав подземных льдов. М.: Изд-во МГУ, 1996. 156 с.
  11. *Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C.* Validity of Radiocarbon Ages of Siberian Yedoma // *Geo. Res. J.* 2017. V. 13. P. 83–95.
  12. *Васильчук Ю.К.* Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций). М.: Изд. Отдел. Теоретических проблем РАН, МГУ, ПНИИИС. 1992. В 2 т. Т. 1. 420 с. Т. 2. 264 с.
  13. *Васильчук Ю.К., Котляков В.М.* Основы изотопной геокриологии и гляциологии. М.: Изд-во МГУ, 2000. 616 с.
  14. *Lapointe E.L., Talbot J., Fortier D., Fréchette B., Strauss J., Kanevskiy M., Shur Y.* Middle to Late Wisconsinan Climate and Ecological Changes in Northern Alaska: Evidences from the Itkillik River Yedoma // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 2017. DOI: 10.1016/j.palaeo.2017.08.006.

## HIGH RESOLUTION STABLE OXYGEN DEUTERIUM DIAGRAMS OF ICE WEDGES OF BATAGAY YEDOMA, NORTH OF CENTRAL YAKUTIA

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

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS A.P. Lisitsyn November 13, 2017

Received December 21, 2017

The main aim of the study is to determine stable oxygen and hydrogen isotope composition of Late Pleistocene syngenetic ice wedges of Batagay yedoma and to obtain the detailed isotope diagrams. Reconstructed mean January palaeotemperature is lower than  $-51\text{ }^{\circ}\text{C}$  than completely confirmed validity of earlier created palaeotemperature maps for the period 30–25 thousand years ago where Batagay section is located within isotherm of  $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

*Keywords:* ice wedges, yedoma, stable isotope, palaeotemperature.