

УДК 551.435.536

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ КИСЛОРОДА И ВОДОРОДА В ЛЕДЯНОМ ЯДРЕ БУЛГУННЯХА НА ЮГЕ ГЫДАНСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Ю. К. Васильчук^{1,*}, А. Н. Курчатова², Н. А. Буданцева¹, В. В. Рогов¹, Ю. Н. Чиждова³

Представлено академиком РАН А. П. Лисицыным 18.06.2018 г.

Поступило 05.07.2018 г.

Получен вертикальный изотопный профиль ледяного ядра бугра пучения – булгуннях Мессояха-1 (координаты: 68°30'32" с.ш., 79°59'53" в.д.), расположенного на юге Гыданского полуострова в пределах Среднемессояхского вала. В изотопном составе льда ядра бугра отмечены не очень значительные вариации: значения $\delta^{18}\text{O}$ изменяются от –14,98 до –16,60‰, величины $\delta^2\text{H}$ от –117,9 до –122,8‰. Этот небольшой разброс значений, вероятно, является результатом интенсивного пучения и довольно быстрого образования бугра. Исходя из особенностей бугра, можно предположить, что первоначально на этом участке было озеро размером 0,5×0,3 км. Затем в результате спуска воды в расположенную поблизости реку озеро начало осушаться и образовался хасырей, занимающий большую часть первичного озера. Сам же булгуннях (пинго) возник при промерзании хасырея при его постепенном осушении.

Ключевые слова: изотопы кислорода, изотопы водорода, булгуннях, керн скважины, Гыданский полуостров.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524883323-328>

Цель работы – получить вертикальный изотопный профиль ледяного ядра бугра пучения – булгуннях Мессояха-1 высотой 10,5 м, длиной 250 м и шириной 95 м с ледяным ядром мощностью 6,5 м (координаты: 68°30'32" с.ш., 79°59'53" в.д.), расположенного на юге Гыданского полуострова в пределах Среднемессояхского вала (рис. 1), определить содержание стабильных изотопов кислорода и водорода во льду и на основе этих данных выявить условия его формирования.

Бугор пучения – булгуннях (пинго) Мессояха-1, с ледяным ядром мощностью 6,5 м (рис. 1) расположен в зоне сплошного с поверхности распространения мёрзлых пород, среднегодовая температура воздуха по данным ближайшей метеостанции Тазовский составляет –9,7°C.

Булгуннях расположен на краю хасырея рядом с озером (рис. 2). Абсолютная высота вершины составляет 42,9 м. На вершине бугра заложена параметрическая скважина (ПМС-4) с отбором керна вскрывшая:

- 1) 0,0–0,1 м. Почвенно-растительный слой;
- 2) 0,1–1,4 м. Суглинок тёмно-коричневый, твёрдомёрзлый, слабобльдистый, линзовидно-слоистой

криотекстуры, шлиры до 3 мм, заторфованный, с растительными остатками;

3) 1,4–3,9 м. Торф тёмно-коричневый, мёрзлый, сильнольдистый, атакситовой криотекстуры, шлиры льда горизонтальные мощностью до 6–8 см, сильно разложившийся, с растительными остатками. В основании слоя вскрыт ледогрунт с частыми прослойками торфа мощностью до 5–6 см, тёмно-коричневого мёрзлого, сильно разложившегося, с растительными остатками;

4) 3,9–6,7 м. Супесь коричневая твёрдомёрзлая, слоистой криотекстуры, шлиры льда горизонтальные и косые мощностью до 3–5 см, с гнездами ожелезнения, растительными остатками;

5) 4,5–11,0 м. Лёд чистый прозрачный;

6) 11,0–15,3 м. Супесь серая твёрдомёрзлая, слабобльдистая, слоистой криотекстуры, шлиры косые, ломанные, мощность субгоризонтальных прослоёв 0,5–1,0 см, субвертикальных – до 2–3 см, с растительными остатками;

7) 15,5–23,0 м. Суглинок тёмно-серый, твёрдомёрзлый, льдистый, слоистой криотекстуры с прослоями льда, в верхней части слоя шлиры под углом 45° мощностью до 3 см, в основании слоя шлиры слабонаклонные и горизонтальные мощностью до 1 см, с прослойками мелкого песка 5–10 мм мощностью, включениями пятен торфа и растительных остатков;

8) 23,0–38,5 м. Песок серый, мелкий, твёрдомёрзлый, льдистый, массивной криотекстуры, в верхней части слоя на глубине 23,5–24,0 м с косыми шли-

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

²Тюменский индустриальный университет

³Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии наук, Москва

*E-mail: vasilch_geo@mail.ru

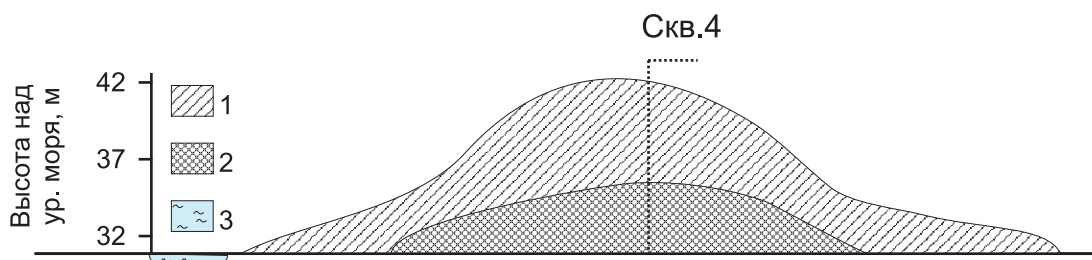


Рис. 1. Профиль бугра пучения Мессояха-1: 1 — мёрзлые породы, слагающие бугор; 2 — ледяное ядро; 3 — озеро.

Таблица 1. Гидрохимический состав льда ядра бугра пучения Мессояха-1

Глубина отбора, м	Na ⁺ , мг/л	K ⁺ , мг/л	Mg ²⁺ , мг/л	Ca ²⁺ , мг/л	Cl ⁻ , мг/л	NO ₃ ⁻ , мг/л	SO ₄ ²⁻ , мг/л
7	1,12	0,72	0,17	3,41	1,11	<0,1	0,36
7,05	1,73	0,81	0,20	4,21	2,65	<0,1	0,90
7,1	1,98	1,52	0,36	4,88	2,67	<0,1	0,85
7,15	1,42	1,98	0,30	4,14	1,74	<0,1	0,54
7,2	1,05	0,65	0,12	4,03	1,49	<0,1	0,45
8,3–8,4	1,82	1,55	0,49	5,29	2,74	0,10	1,10
8,4–8,5	1,29	1,24	0,13	5,68	1,51	<0,1	0,53
8,5–8,6	0,72	0,54	0,18	5,41	1,14	0,10	0,41
9,2–9,3	0,87	0,61	0,19	5,40	1,26	0,10	0,40
9,4–9,5	0,78	0,48	0,10	4,71	0,94	0,10	0,41
9,5–9,6	1,05	0,62	0,14	5,40	1,39	0,17	0,52
10	0,75	0,47	0,15	5,20	0,93	0,13	0,34
10,3–10,4	0,47	0,26	0,10	3,40	0,57	0,18	0,27
10,5	0,80	0,38	0,18	4,15	1,12	0,17	0,53
10,6–10,7	0,42	0,47	0,12	4,88	0,98	<0,1	0,44

рами льда под углом 15°–30°, второй прослой с косыми наклонными шлирами льда на глубине 32,2–32,5 м мощностью до 0,5–1 см; между этими полосами и в основании слоя криотекстура массивная, песок слабоблудистый, с прослойками (до 1 см) растительных остатков (прослойки торфа и веточек хорошей сохранности), включениями мелкого гравия.

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 $\delta^{18}\text{O}$.

Гидрохимические определения выполнены на ионном хроматографе “Стайер” (предел детектиро-

Таблица 2. Изотопный состав льда бугра пучения Мессояха-1

Глубина отбора, м	Тип льда	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	d_{exc} , ‰
ПМС 4				
0,5	СТС шлир	-15,73	-119,3	6,5
0,5	Лёд-цемент	-15,70	-119,7	5,9
0,5	Лёд-цемент	-13,50	-117,9	-9,9
4,2–4,4	Шлир	-14,85	-122,5	-3,7
7,0	Лёд ядра	-15,24	-119,3	2,62
7,05	Лёд ядра	-15,98	-119,7	8,14
7,10	Лёд ядра	-15,44	-119,7	3,82
7,15	Лёд ядра	-15,37	-120,4	2,56
7,20	Лёд ядра	-15,40	-117,9	5,3
8,3–8,4	Лёд ядра	-15,69	-121,1	4,42
8,4–8,5	Лёд ядра	-15,50	-122,5	1,5
8,5–8,6	Лёд ядра	-15,57	-122,5	2,06
9,2–9,3	Лёд ядра	-15,08	-120,0	0,64
9,4–9,5	Лёд ядра	-14,98	-120,7	-0,86
9,5–9,6	Лёд ядра	-16,05	-120,7	7,7
10,0	Лёд ядра	-16,16	-122,8	6,48
10,3–10,4	Лёд ядра	-15,71	-121,8	3,88
10,5	Лёд ядра	-15,79	-121,4	4,92
10,6–10,7	Лёд ядра	-16,60	-124,6	8,2
15,5–15,8	Шлир	-14,45	-118,6	-3
15,5–15,8	Лёд-цемент	-13,90	-119,7	-8,5
20,1–20,3	Лёд-цемент	-12,89	-117,9	-14,78
20,1–20,3	Лёд-цемент	-13,26	-118,3	-12,22
20,7–22,0	Шлир нижний толстый	-14,04	-109,5	2,82
20,7–22,0	Шлир верхний тонкий	-7,63	-87,7	-26,66
23,7	Лёд-цемент	-12,32	-112,3	-13,74
23,7	Лёд-цемент	-13,08	-114,4	-9,76
24,0	Шлир	-16,28	-127,7	2,54
24,0	Лёд-цемент	-16,05	-126,3	2,1
24,0	Лёд-цемент	-14,69	-124,6	-7,08
32,2–32,5	Шлир	-14,50	-123,2	-7,2
32,-32,5	Лёд-цемент	-11,46	-110,9	-19,22

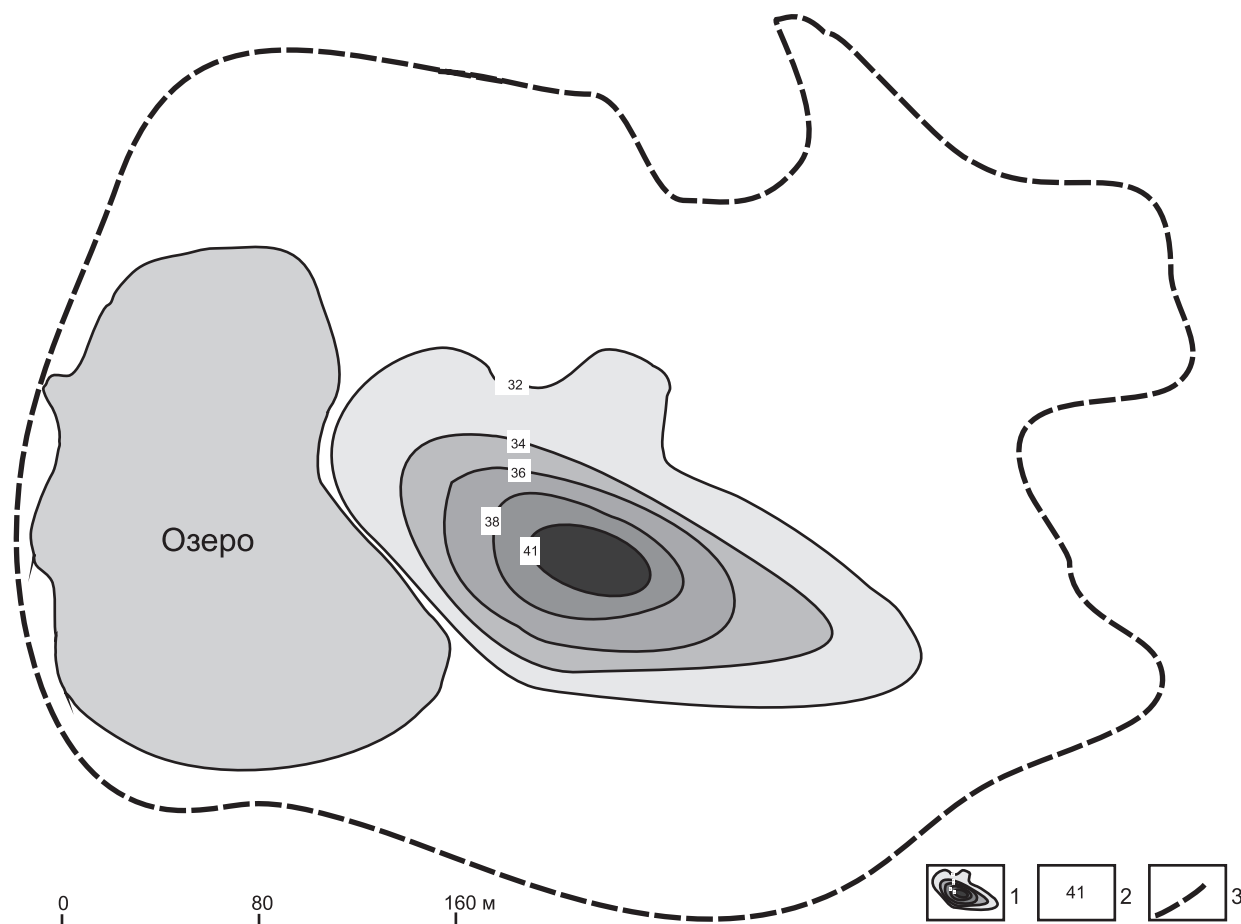


Рис. 2. Изогипсы в пределах бугра пучения Мессояха-1 (1), абсолютные отметки, м (2), контур хасырея (3).

вания по хлорид-иону 0,02 мг/л) в эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Судя по гидрохимическому составу льда (табл. 1) и весьма однородному соотношению $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$, варьирующему в основном от 2 до 3, вода, из которой сформировался лёд ядра булгуньяха, примерно одна и та же и относится к озёрным хлоридно-кальциевым водам.

В изотопном составе льда ядра бугра отмечены не очень значительные вариации (табл. 2): значения $\delta^{18}\text{O}$ изменяются от $-14,98$ до $-16,60\text{‰}$, а величины $\delta^2\text{H}$ от $-117,9$ до $-122,8\text{‰}$. Этот небольшой разброс значений, вероятно, является результатом интенсивного пучения и довольно быстрого образования бугра. Изотопные параметры ледяного ядра ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) близки к линии метеорных вод (рис. 3).

Обращают на себя внимание сравнительно низкие значения d_{exc} (до $-14,78\text{‰}$) в текстурных льдах, подстилающих и перекрывающих ледяное ядро отложений, во льду ядра величины изменяются от $-0,86$ до $8,2\text{‰}$.

Об изотопном составе кислорода и водорода атмосферных осадков района исследования можно судить по данным, полученным по программе GNIP на станции в г. Салехарде с января 1996 по декабрь 2000 года. Среднегодовые значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ составляют $-17,48$ и $-136,2\text{‰}$ соответственно. Осреднённые значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ летнего периода составляют $-12,48$ и $-96,2\text{‰}$ соответственно. При этом величина дейтериевого эксцесса осадков относительно низкая и составляет $3,6\text{‰}$ как для осадков всего года, так и для исключительно летних осадков. Изотопный состав льда ядра указывает на то, что источником его формирования служила, скорее всего, озёрная вода, в которой летние осадки преобладали над зимними, что выражается в положении фигуративных точек льда между среднегодовыми и летними величинами $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ осадков (см. рис. 3). Лёд ядра, судя по изменению значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ с глубиной (рис. 4) и соотношению $\delta^{18}\text{O}-\delta^2\text{H}$ формировался при промерзании сверху вниз, что выражается в изотопном фракционировании, отмеченном в нижних 1,2 м льда. В верхней части ледяного ядра значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ очень

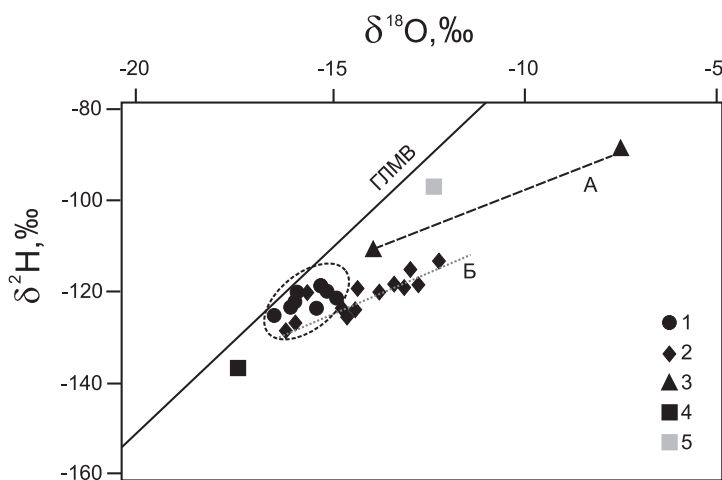


Рис. 3. Изотопные параметры ледяного ядра и текстурных льдов бугра пучения – булгуньяха: 1 – лёд ядра; 2 – текстурный лёд; 3 – шпир на глубине 22 м; 4 – среднегодовые осадки района; 5 – летние осадки района; ГЛВМ – Глобальная Линия Метеорных Вод; А – линия соотношения $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ в шпире льда на глубине 22 м; Б – линия соотношения $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ в текстурных льдах.

однородны, что свидетельствует об открытой системе льдообразования, или/и о больших скоростях промерзания. В нижней части выражено незначительное уменьшение значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ с глубиной при одновременном увеличении значений d_{exc} , что свидетельствует о промерзании в закрытой системе (замкнутый талик).

В изотопных параметрах текстурных сегрегационных льдов выражены процессы изотопного фракционирования, сопровождающие промерзание в закрытой системе – последовательное уменьшение значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ от первых порций льда к последним при одновременном увеличении d_{exc} . Закрытая система создается при промерзании сверху вниз изолированного слоя, насыщенного водой.

Изотопное фракционирование, сопровождающее льдообразование в закрытой системе, проявилось при образовании ледяных шпиров на глубине 22 м. При их формировании отмечено максимально неравновесное изотопное фракционирование (величина $\delta^{18}\text{O}$ от верхнего к нижнему шпире уменьшилась почти на 7‰ с $-7,63$ до $-14,04$ ‰, а $\delta^2\text{H}$ только на 20‰).

При максимальном фракционировании кислорода-18, дейтерий фракционировал менее выражено; это сформировало линию с угловым коэффициентом около 3 на диаграмме $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ (рис. 3). Такой наклон значительно меньше характерного для льда, сформированного в закрытой системе [2, 3]. Это может быть следствием неравновесного изотопного фракционирования в ходе многократных циклов промерзания–протаивания, предшествующих переходу в многолетнемёрзлое состояние.

Подобное неравновесное фракционирование кислорода-18 и дейтерия при образовании льда бугров пучения было отмечено авторами в изотопном составе льда пинго Уэзер [1]. Общей чертой этих двух булгуньяхов (Мессояха и Уэзер) является то, что они находятся в непосредственном контакте с озером, послужившем источником воды для формирования льда ядра.

В пинго Уэзер близ залива Прудо на Аляске часть льда (на глубинах от 2 до 8 м) ледяного ядра сформировалась в условиях относительно свободного поступления воды к фронту промерзания, а нижняя часть ледяного ядра (на глубинах от 8 до 13 м) формировалась при промерзании замкнутой линзы воды. В целом для булгуньяхов характерна смена условий формирования льда ядра от свободного подтока воды к исчерпанию источника воды в условиях промерзания замкнутого талика [4, 5].

Изотопные характеристики льда пинго Уэзер на глубинах от 2 до 8 м очень однородны ($\delta^{18}\text{O}$ от $-15,7$ до $-17,3$ ‰ и $\delta^2\text{H}$ от $-135,5$ до $-143,0$ ‰), но при общем небольшом диапазоне вариаций $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ (1,6 и 7,6‰ соответственно) на парной диаграмме визуализируются линией с наклоном, близким к 3. Изотопный состав этой секции льда К. Йошикава с соавторами [4] интерпретирует как показатель непрерывной миграции воды из окружающих незамерзающих бассейновых отложений в линзу под бугром, которая временно прерывалась несколькими периодами более медленного подтока воды или её меньшего количества для льдообразования.

Текстурные льды в отложениях, подстилающих и перекрывающих ледяное ядро, по своему изотоп-

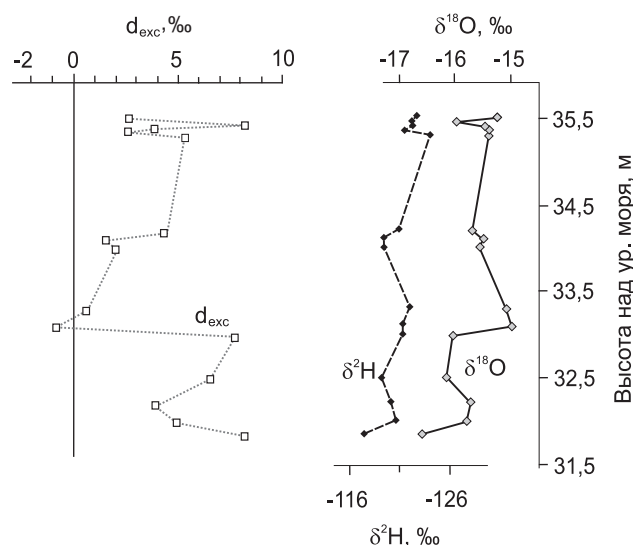


Рис. 4. Распределение по глубине $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и $d_{\text{exс}}$ в ледяном ядре бугра пучения – булгуньяха (пинго) Мессояха-1.

ному составу отражают тот же источник влаги, из которого сформировалось ледяное ядро.

Исходя из особенностей бугра, можно предположить, что первоначально на этом участке было озеро размером $0,5 \times 0,3$ км. Затем, в результате спуска воды в расположенную поблизости реку, озеро начало осушаться и образовался хасырей, занимающий большую часть первичного озера. Сам же булгуньях (пинго) возник при промерзании хасырея при его постепенном осушении. Сейчас от первичного озера осталось сравнительно небольшое озеро размером $0,2 \times 0,12$ м. Возможно, за свою историю озеро несколько раз осушалось и вновь наполнялось при меандрировании русла реки, протаивании льдистых грунтов или увеличении количества осадков.

На первой стадии формирования ледяного ядра, по нашему мнению, в подмерзлотный талик мог происходить дополнительный подток воды из озера, располагавшегося в непосредственной близости от бугра. Впоследствии ядро формировалось в условиях закрытой системы при промерзании замкнутого талика.

Источники финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (в рамках проекта № 14–27–00083–П – изотопные определения) и грантов РФФИ (№ 18–05–00376 – описание керн и отбор образцов; 18–05–60080 Арктика – криолитологический анализ; 18–05–60272 Арктика – гидрохимические определения и интерпретация результатов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vasil'chuk Yu.K., Lawson D.E., Yoshikawa K., Budantseva N.A., Chizhova Ju.N., Podborny Ye.Ye., Vasil'chuk A.C. // *Cold Regions Sci. and Technol.* 2016. V. 128. P. 13–21. DOI:10.1016/j.coldregions.2016.05.001
2. Lacelle D. // *Permafrost and Periglacial Processes.* 2011. V. 22. P. 13–25.
3. Souchez R.A., Jouzel J. // *J. Glaciol.* 1984. V. 30. P. 369–372.
4. Yoshikawa K., Sharkhuu N., Sharkhuu A. // *Permafrost and Periglacial Processes.* 2013. V. 24. № 3. P. 175–183.
5. Ishikawa M., Yamkhin J. // *Permafrost and Periglacial Processes.* 2016. V. 27. Iss. 3. P. 297–306.

VARIATIONS OF STABLE OXYGEN AND HYDROGEN ISOTOPES IN THE PINGO ICE CORE, SOUTH OF THE GYDAN PENINSULA

Yu. K. Vasil'chuk¹, A. N. Kurchatova², N. A. Budantseva¹, V. V. Rogov¹, J. N. Chizhova³

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

²*Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation*

³*Institute of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS A.P. Lisitsyn June 18, 2018

Received July 5, 2018

The vertical isotopic profile of the pingo Messoyakha-1 (coordinates: 68°30'32" N, 79°59'53" E) ice core, obtained in the south of the Gydan Peninsula in the Middle Messoyakha swell. There is no significant variations of the isotopic composition of pingo ice core: $\delta^{18}\text{O}$ values vary from -14.98 to -16.60‰ , $\delta^2\text{H}$ values vary from -117.9 to -12.8 . This small scatter of values is probably the result of intense heaving and rather rapid formation of the pingo. Basing on the features of the pingo, it can be assumed that initially there was a lake of 0.5 km length and 0.3 km width in this site. Then, as a result of water draining to a nearby river, the lake began to dry out and alas, which occupies most of the primary lake area, was formed. Pingo arose during the freezing of the alas under its gradual drying.

Keywords: oxygen isotopes, hydrogen isotopes, pingo, ice core, Gydan Peninsula.