

УДК 551.345.2

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ВАРИАЦИЯХ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ В ЛЕДЯНОМ ЯДРЕ БУЛГУННЯХА НА ЮГЕ ТАЗОВСКОГО ПОЛУОСТРОВА

© 2017 г. Ю. К. Васильчук¹, Н. А. Буданцева¹, А. К. Васильчук^{1,*},
В. В. Рогов¹, Е. Е. Подборный², Ю. Н. Чижова¹

Представлено академиком РАН Н.С. Касимовым 08.09.2014 г.
Поступило 05.11.2014 г.

Цель работы – получить вертикальный изотопный профиль мощного ледяного ядра булгуньяха Песцовое на юге Тазовского п-ова, определить содержание стабильных изотопов кислорода и водорода во льду и на основе этих данных выявить условия формирования льда. Для изотопного профиля льда булгуньяха было выделено два тренда: незначительное утяжеление значений $\delta^{18}\text{O}$ (~1.5), δD (~9‰) в интервале глубин 12–15 м и постепенное облегчение изотопного состава в интервале глубин 15–26 м: на 3.8‰ по $\delta^{18}\text{O}$, на 23‰ по δD . Формирование ледяного ядра булгуньяха, происшедшее в условиях полузакрытой системы, привело к фракционированию, выразившемуся в изменении изотопного состава льда более чем на 4‰ по $\delta^{18}\text{O}$ и более чем на 20‰ по δD .

DOI: 10.7868/S0869565217040193

Цель работы – получить вертикальный изотопный профиль мощного ледяного ядра булгуньяха Песцовое, расположенного в долине р. Евояха, на юге Тазовского п-ова (рис. 1), определить содержание стабильных изотопов кислорода и водорода во льду и на основе этих данных выявить условия формирования льда. Булгуньяхи – мерзлотные формы рельефа в виде куполообразных возвышений (~10–20, в отдельных случаях до 50–70 м) с ледяным ядром.

Большие скопления булгуньяхов на Тазовском п-ове ранее изучены в бассейнах Надыма, Ямсовея, Евояхи, Табьяхи, Хадуттэ [1, 2]. Высота их от 4–5 до 15–20 м, диаметр основания от десятков до первых сотен метров. По периферии крупных булгуньяхов нередко наблюдается “пьедастал” в виде террасовидной ступеньки высотой до 1–2 м. Сейчас здесь происходит не только формирование новых инъекционных, инъекционно-сегрегационных бугров, но и продолжается рост булгуньяхов, сформировавшихся в более ранние этапы голоцена [3].

На юге Тазовского п-ова, в пределах нефтяного месторождения Песцовое (66°10' с. ш., 76–77° в. д.), примерно в 100 км от Нового Уренгоя (рис. 1) опи-

сано более 20 булгуньяхов высотой 15–20, диаметром 150–200 м. На одном из булгуньяхов высотой 17 м в 10 км севернее ст. Тундра выполнен отбор перекрывающего торфа для радиоуглеродных определений, изучения внутреннего строения ледяного ядра и изотопного состава льда, проведено бурение скважины глубиной более 30 м.

В разрезе бугра вскрыты: торф темно-коричневый мощностью 0.5 м, подстилаемый суглинком оторфованным мощностью 0.4 м; суглинок



Рис. 1. Карта расположения булгуньяхов в районе месторождения Песцовое, в 10 км севернее ст. Тундра, в 29–30 км после поворота на Песцовое, где отметка 98 км на шоссе, идущем на север от Нового Уренгоя.

¹ Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

² ООО Центр гидроэкологических исследований,
Санкт-Петербург

* E-mail: vasilch_geo@mail.ru

Таблица 1. Радиоуглеродные датировки торфа, перекрывающего булгуннях высотой 17 м в районе месторождения Песцовое, в 10 км севернее ст. Тундра

Полевой номер образца	Глубина, м	¹⁴ C-датировка, лет	Лабораторный номер образца
Шурф 1			
397-YuV/1	0–0.07	2560 ± 70	ГИН-13329
397-YuV/4	0.3–0.4	5220 ± 50	ГИН-13332
397-YuV/8	0.85–0.9	5080 ± 50	ГИН-13335
Шурф 2			
397-YuV/9	0.05–0.15	5400 ± 40	ГИН-13336

темно-серый плотный многолетнемерзлый с массивной и горизонтально-слоистой (в нижней части слоя) криотекстурой, мощностью 11.1 м; переслаивание суглинка и льда, толщина слоев льда 5–7, суглинка 10–12 см; лед слоистый, мощностью 14.3 м, отмечено переслаивание мутного, прозрачного, молочно-белого льда. В нижних 7 м встречены прослой суглинка толщиной 2–3 см; суглинок серый плотный, мощность слоя 5 м, с прослоями льда толщиной 5–8 см.

Для определения возраста булгуннях в его центральной части и близ подножия на пьедестале опробован торф. В центральной части датирован поверхностный торф в 2560 ± 70, торф с глубины 0.3–0.4 м – 5220 ± 50 и торф с глубины 0.85–0.9 м возраста 5080 ± 50 лет (табл. 1). На периферии бугра торф с глубины 0.05–0.15 м датирован в 5400 ± 40 лет. Радиоуглеродное датирование торфа, перекрывающего булгуннях Песцовое, позволило установить, что пучение происходило в два этапа: на первом этапе оно началось по периферии бугра около 5000 лет назад, а на втором этапе пучение активизировалось около 2500 лет назад в центральной части булгуннях. Скорость подъема поверхности булгуннях была очень высока, 2–3 см/год, что достаточно быстро привело к формированию крупного бугра [4]. Отметим, что в смежных районах Тазовского п-ова в этот период шел активный рост миграционных бугров пучения (пальза) на торфяниках [5].

В массивном льду ядра булгуннях и из шпиров перекрывающих и подстилающих отложений проанализировано содержание стабильных изотопов кислорода и водорода с шагом 0.2–0.6 м. Вариации стабильных изотопов исследовали в изотопной лаборатории географического факультета МГУ на масс-спектрометре Delta-V со стандартной опцией газ-бенч. Для измерений использовали международный стандарт среднеокеанической воды V-SMOW ($\delta^{18}\text{O} = 0\text{‰}$, $\delta\text{D} = 0\text{‰}$), международный стандарт GISP ($\delta^{18}\text{O} = -24.76\text{‰}$, $\delta\text{D} = -189.5\text{‰}$), лабораторные стандарты МАГАТЭ

(IAEA-12, $\delta^{18}\text{O} = -12.10\text{‰}$, $\delta\text{D} = -85.9\text{‰}$; IAEA-13, $\delta^{18}\text{O} = -33.35\text{‰}$, $\delta\text{D} = -257.2\text{‰}$), собственный лабораторный стандарт МГУ – снег ледника Гарабаши ($\delta^{18}\text{O} = -15.60\text{‰}$, $\delta\text{D} = -110.0\text{‰}$). Точность определений $\delta^{18}\text{O} 0.1\text{‰}$, $\delta\text{D} - 0.6\text{‰}$.

Самые верхние горизонты льда на глубине 12 м на контакте с перекрывающими отложениями характеризуются несколько более низкими значениями $\delta^{18}\text{O} (-13.0)$, $\delta\text{D} = -106.5\text{‰}$, повышающимися к глубине 15 м (табл. 2) до значений $\delta^{18}\text{O} = -11.6\text{‰}$, $\delta\text{D} = -97.9\text{‰}$.

В интервале глубин 16–18 м изотопный состав сравнительно постоянный (δD около -105 , $\delta^{18}\text{O}$ около -12.5‰) с незначительными вариациями между образцами. Значения d_{exc} в верхних 9 м ледяного ядра линзы отрицательные и на глубине 16 м даже составляют -7.36‰ .

Нижняя часть ледяного ядра булгуннях характеризуется в целом снижением значений $\delta^{18}\text{O}$ до -15.23‰ , δD до -120.0‰ . Значения d_{exc} здесь увеличиваются и становятся в нижних 4-х м практически везде положительными, до 6.72‰ .

Изотопные вариации в ледяном ядре булгуннях Песцовое характеризуются значительным диапазоном значений $\delta^{18}\text{O} - \sim 6\text{‰}$ – и контрастным распределением в толще 15-метровой ледяной залежи, вначале сверху вниз последовательно убывающим ($\delta^{18}\text{O} - 13...-11.61\text{‰}$), а ниже – последовательно возрастающими ($\delta^{18}\text{O} - 11.61...-15.23\text{‰}$). Таким образом, для изотопного профиля льда булгуннях Песцовое можно выделить два тренда: незначительное утяжеление значений $\delta^{18}\text{O} (\sim 1.5\text{‰})$, $\delta\text{D} (\sim 9\text{‰})$ в интервале глубин 12–15 м и постепенное облегчение изотопного состава в интервале глубин 15–26 м: на 3.8‰ по $\delta^{18}\text{O}$ и на 23‰ по δD , что указывает на двухстадийность формирования ледяного ядра булгуннях. Изотопный профиль по вертикали (рис. 2) дугообразный, при этом изотопные вариации не очень значительны.

Таблица 2. Вариации $\delta^{18}\text{O}$, δD , d_{exc} в ледяном ядре и в шлирах из подстилающих (*) и перекрывающих (**) лед отложений булгуннях Песцовое

Глубина, м	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	δD , ‰	d_{exc} , ‰	Глубина, м	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	δD , ‰	d_{exc} , ‰
11.5**	-12.81	-102.2	0.28	20.9	-12.57	-108.1	-7.54
12	-13.05	-106.5	-2.1	21	-13.21	-106.9	-1.22
12.3	-12.68	-104	-2.56	21.4	-13.25	-110.2	-4.2
12.7	-12.56	-103.6	-3.12	21.6	-11.95	-102.9	-7.3
13	-12.91	-104.1	-0.82	21.8	-13.41	-104	3.28
13.4	-13	-100.5	3.5	22	-14.24	-107.2	6.72
13.8	-12.59	-103.6	-2.88	22.3	-13.39	-108.5	-1.38
14	-12.38	-101.3	2.26	22.8	-13.59	-106.1	2.62
14.3	-11.66	-98.4	-5.12	23	-14.08	-111.4	1.24
14.7	-11.6	-94.6	-1.8	23.2	-13.63	-111.3	-2.26
15	-11.61	-97.9	-5.02	23.5	-14.11	-108.5	4.38
15.8	-12.05	-95.3	1.1	23.8	-14.01	-110.9	1.18
16	-12.18	-104.8	-7.36	24	-14.1	-111.5	1.3
16.3	-11.42	-96	-4.64	24.3	-13.6	-104.7	4.1
16.7	-11.87	-93.2	1.76	24.7	-14.56	-109.2	7.28
17	-12.46	-104.8	-5.12	24.9	-14.05	-108.1	4.3
17.2	-12.05	-104.7	-8.3	25	-14.88	-119.6	-0.56
17.5	-12	-96.3	-0.3	25.2	-15.19	-116.5	5.02
17.8	-11.97	-98.4	-2.64	25.8	-15.85	-119.9	6.9
18	-12.74	-103.8	-1.88	26	-15.23	-120	1.84
18.3	-11.71	-96.3	-2.62	26.1	-15.12	-117.8	3.16
18.5	-11.58	-100.2	-7.56	26.5	-15.38	-121.1	1.94
19	-12.63	-104	-2.96	26.9	-15.31	-120.2	2.28
19.6	-12.7	-98.8	2.8	27.2	-15.31	-123	-0.52
19.8	-12.33	-102.6	-3.96	27.8	-15.21	-117.5	4.18
20	-13.1	-105.8	-1	29.5*	-14.57	-115	1.56
20.3	-13.2	-104.3	1.3	30.3*	-14.09	-111.2	1.52

Булгуннях Песцовое образовался на дне осушающейся озерной впадины (хасырея) при ее промерзании, со слабой дополнительной подпиткой водой, что привело к формированию изменяющегося по высоте, дугообразного изотопного профиля. Формирование ледяного ядра булгуннях, происходившее в условиях полузакрытой системы, привело к фракционированию, выразившемуся в изменении изотопного состава льда более чем на 4 по $\delta^{18}\text{O}$, более чем на 20‰ по δD и отклонении от глобальной линии метеорных вод (рис. 3).

Формирование ледяного ядра бугра Песцовое, возможно, происходило в две стадии. Нижняя часть ядра, вероятно, сформировалась при постоянном пополнении линз воды под бугром. Верхняя часть его ледяного ядра образовалась при по-

следовательном промерзании сверху замкнутого объема воды, что привело к изотопному истощению льда сверху вниз. Изотопная диаграмма булгуннях отражает совместное участие активного инъекционного и сегрегационного (конжеляционного) льдообразования, поэтому выгнутость кривой сравнительно невелика.

Формирующийся лед всегда изотопически тяжелее исходной воды не менее чем на 1–3‰ по кислороду и на 10–25‰ по дейтерию, при этом вода, отжимаемая растущим льдом при последовательном промерзании, становится все более легкой и соответственно лед в последующих объемах становится все легче [6]. Этой схеме промерзания в полной мере отвечают верхние 5–6 м ледяного ядра булгуннях Песцовое, где отмечены более высокие значения $\delta^{18}\text{O}$ на 3–5‰, δD на

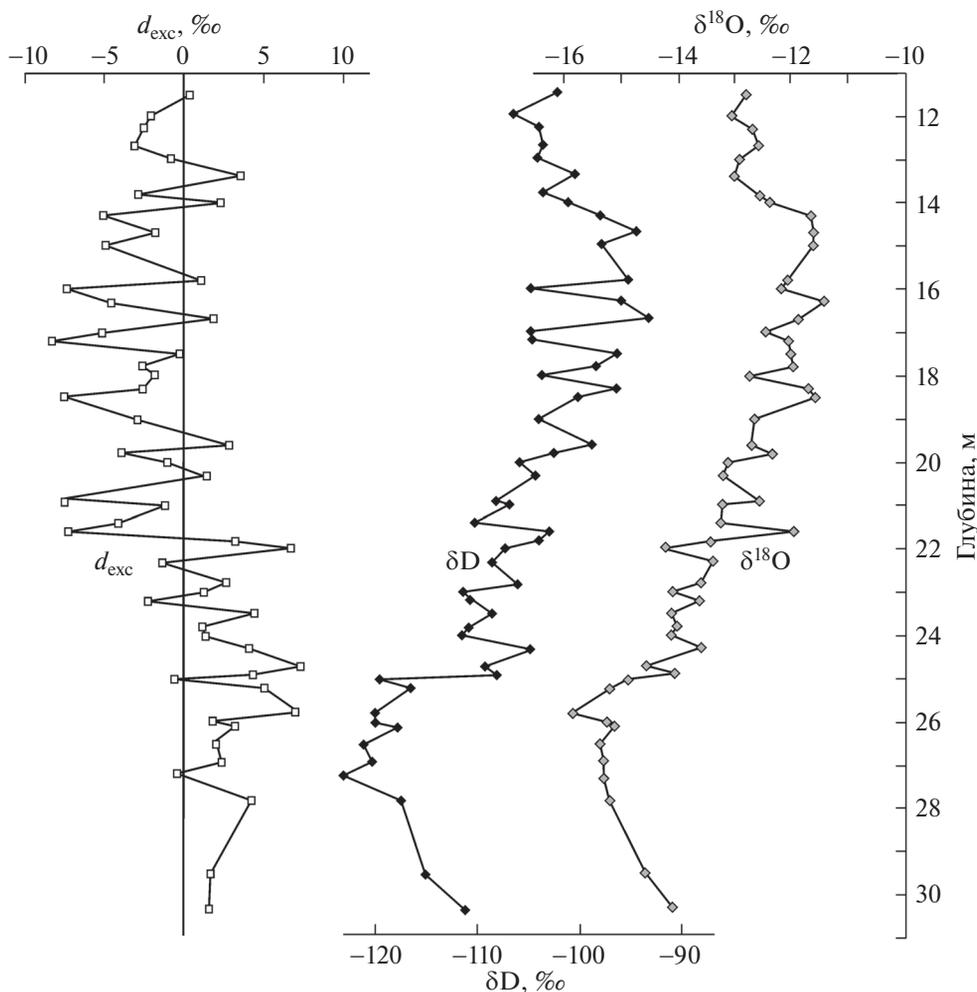


Рис. 2. Распределение по глубине значений $\delta^{18}\text{O}$, δD , d_{exc} в ледяном ядре булгуньяха Песцовое.

10–20‰, и они, видимо, отражают стадию роста бугра с преобладанием инъекционного процесса. Нижние 7–8 м характеризуются снижением значений $\delta^{18}\text{O}$ на 4–6‰, δD на 20–25‰ и, вероятно, отражают большее участие процессов сегрегационного льдообразования при образовании этой части ледяной линзы.

Принципиальная возможность прироста ранее образовавшихся бугров в результате последующих инъекций показана в [7] на основании исследования химического состава очень крупного бугра пучения в районе пос. Мессояха. Инъекция (и сегрегация) воды при образовании ядра этого бугра пучения была неоднократной; химический состав в промерзающем подошрном талике при этом изменился от гидрокарбонатно-магниево-кальциевого (на ранней стадии пучения) до гидрокарбонатного натриевого (на более поздних стадиях); верхние слои льда (глубина 2–5 м) образовались при сравнительно быстрой и полной кристаллизации воды, а залегающие глубже —

при более медленной. На это указывает незначительное содержание в нижней части ледяной линзы ионов Ca, Mg, которые при медленной кристаллизации выпадают из раствора в осадок [7].

Определение изотопного состава булгуньяхов выполняли канадские [8, 9] и японские [10] исследователи, изучавшие их на севере Канады, на Шпицбергене, в континентальных районах Аляски. Наши данные в значительной мере согласуются с этими исследованиями, особенно с изотопными материалами, полученными по булгуньяхам, промерзавшим в условиях закрытой системы [11].

Для территории криолитозоны России вертикальный изотопный профиль мощного ледяного ядра булгуньяха получен впервые, что имеет важное значение для исследования генезиса этих весьма распространенных криогенных образований, позволяя разделять по характеру изотопного профиля булгуньяхи, сформировавшиеся в условиях подтока влаги (в открытой системе) и без подтока влаги (в закрытой системе). Это даст воз-

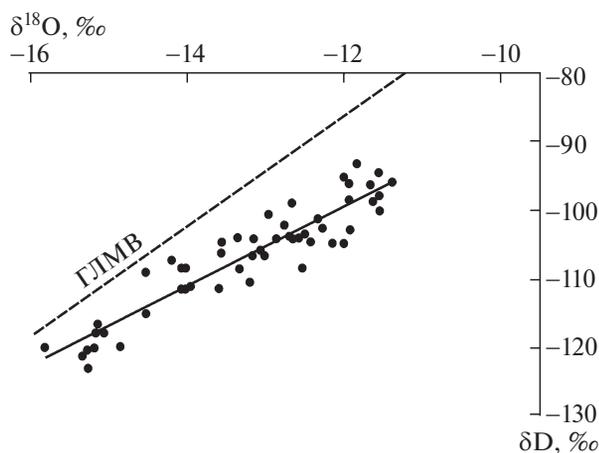


Рис. 3. Соотношение $\delta^{18}\text{O}$, δD во льду булгуньяха Песцовое. ГЛМВ – глобальная линия метеорных (атмосферных) вод X. Крейга.

возможность прогнозирования мест возможного образования бугров и их размеров. Также установлено, что даже крупные булгуньяхи могут заметно и быстро увеличиваться в размерах, что представляет определенную опасность при прокладке вблизи них линейных сооружений: водоводов, линий электропередач, трубопроводов, дорог.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 14–27–00083.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А. // Инж. геология. 2010. № 4. С. 14–21.
2. Андреев Ю.Ф. // Геология и геохимия. 1960. В. 3 (IX). С. 76–94.
3. Геокриологические условия Западно-Сибирской газоносной провинции / Под ред. Е.С. Мельникова. Новосибирск: Наука, СО. 1983. 199 с.
4. Васильчук Ю.К. // В кн.: Инженерная геология России. Т. 2. Инженерная геодинамика территории России. М.: Изд-во КДУ, 2013. Гл. 22. С. 361–464.
5. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C. // Radiocarbon. 1998. V. 40. № 2. P. 895–904.
6. Васильчук Ю.К. // Криосфера Земли. 2011. Т. XV. № 3. С. 51–55.
7. Анисимова Н.П., Карпов Е.Г. Геокриологические и гидрогеологические исследования Якутии. Якутск, 1978. С. 125–137.
8. Mackay J.R. // Canad. J. Earth Sci. 1990. V. 27. № 8. P. 1115–1125.
9. Lacelle D. // Permafrost and Periglacial Processes. 2011. V. 22. № 1. P. 13–25.
10. Yoshikawa K., Sharkhuu N., Sharkhuu A. // Permafrost and Periglacial Processes. 2013. V. 24. № 3. P. 175–183.
11. Yoshikawa K., Lawson D., Sharkhuu N. Permafrost, X Intern. Conf. Proc. Salekhard, 25–29 June 2012. Salekhard: The Northern Publ., 2012. V. 1. P. 473–478.