

УДК 536.2; 556; 622.24

Технология экологически чистого проникновения в подледниковое озеро Восток

Канд. физ.-мат. наук А. А. ЗАХАРОВ
НИИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ
arcady.zakharov@gmail.com

Существующие технологии глубокого бурения льда не обеспечивают экологически чистое проникновение в подледниковые озера Антарктиды для проведения научных исследований. Для решения этой задачи предлагается новая технология скоростного экологически чистого бурения льда и вскрытия подледниковых озер с помощью комбинированного теплового бурового снаряда. Конструкция бурового снаряда исключает контакт циркулирующей нагретой жидкости с водой и стенками скважины. Вода, образовавшаяся в результате плавления льда тепловым снарядом, предотвращает смыкание стенок скважины под действием горного давления. Результаты теплового расчета демонстрируют возможность бурения глубокой скважины к подледниковому озеру Восток за несколько суток. Новая технология бурения льда обеспечит возможность исследования озера Восток с целью поиска жизни в экстремальных условиях и позволит разместить в озере детектор нейтринного телескопа для регистрации космических нейтрино сверхвысоких энергий.

Ключевые слова: подледниковое озеро, бурение льда, тепловой буровой снаряд, экология.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 12.07.2024, одобрена после рецензирования 08.08.2024, принята к печати 15.08.2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-19-24

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Захаров А. А. Технология экологически чистого проникновения в подледниковое озеро Восток. // Вестник Международной академии холода. 2024. № 4. С. 19–24. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-19-24

Technology for environmentally friendly entry into the subglacial Lake Vostok

Ph. D. A. A. ZAKHAROV
NRC «Kurchatov Institute» — PNPI
arcady.zakharov@gmail.com

Existing technologies of deep ice drilling do not provide environmentally friendly penetration into the subglacial lakes of Antarctica for scientific research. To solve this problem, a new technology of high-speed environmentally friendly ice drilling and opening of subglacial lakes using a combined thermal drilling unit is proposed. The design of the drilling unit eliminates contact of the circulating heated liquid with water and the borehole walls. Water formed as a result of ice melting by the thermal unit prevents the closure of the borehole walls under the action of rock pressure. The results of the thermal calculation demonstrate the possibility of drilling a deep borehole to the subglacial Lake Vostok in a few days. The new ice drilling technology will provide the opportunity to study Lake Vostok in order to search for life in extreme conditions and will allow the installation of a neutrino telescope detector in the lake to register ultra-high-energy cosmic neutrinos.

Keywords: subglacial lake, ice drilling, thermal drilling unit, ecology.

Article info:

Received 12/07/2024, approved after reviewing 08/08/2024, accepted 15/08/2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-19-24

Article in Russian

For citation:

Zakharov A. A. Technology for environmentally friendly entry into the subglacial Lake Vostok. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No 4. p. 19-24. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-19-24

Введение

Существующие на сегодняшний день технологии глубокого бурения льда [1]–[9] не позволяют осуществить проникновение в подледниковое озеро Восток без нане-

сения экологического ущерба его водной среде. Для решения этой задачи предлагается новая технология скоростного экологически чистого бурения льда и вскрытия подледникового озера. Возможности скоростного бурения

демонстрируются в данной работе результатами теплового расчета, а экологически чистое бурение и вхождение бурового снаряда в озеро обеспечиваются новой технологией с использованием теплоносителя вместо буровой жидкости. Смыкание стенок скважины под действием горного давления предотвращается водой, образовавшейся в результате плавления льда тепловым снарядом.

Озеро Восток находится в Антарктиде, имеет длину 275 км, ширину 50 км и сверху закрыто ледником. В месте расположения полярной станции Восток водный слой равен 680 м, а толщина ледника достигает 3758 м [10]. Ледник движется над озером со скоростью 2 м/год [11]. Геотермальный поток 46 мВт/м² вызывает циркуляцию воды в озере, которая приводит к тому, что в северной части озера происходит плавление нижней поверхности льда, а в его южной части наблюдается приращение льда со скоростью 4,5 мм/год [12]. Слой аккреционного льда достигает толщины 230 м [13].

Применение новой технологии бурения льда позволит начать научные исследования внутри озера. Важнейшей научной задачей, связанной с озером Восток, является поиск в нем возможных форм жизни. В озере могут присутствовать реликтовые микроорганизмы, обладающие уникальными способностями адаптации к экстремальным условиям. Это делает озеро Восток также важным объектом изучения для астробиологии. Значительные размеры озера позволяют рассматривать его в качестве земного аналога океанов, которые существуют под мощными ледяными панцирями Европы (спутник Юпитера) и Энцелад (спутник Сатурна) [14]. Еще один науч-

ный интерес к озеру Восток заключается в создании уникального астрофизического инструмента. В экстремально низких фоновых условиях подледникового озера можно разместить детектор нейтринного телескопа для регистрации космических нейтрино сверхвысоких энергий [15], изучение которых приблизит ученых к пониманию новой физики.

Описание технологии

Предлагаемая технология бурения отличается от известных тем, что бурение льда и вскрытие озера производится комбинированным тепловым буровым снарядом, который состоит из тепловой буровой коронки с электрическим нагревательным элементом и герметичного гибкого трубопровода труба-в-трубе, в котором циркулирует нагретый теплоноситель [16]. Принципиальная схема комбинированного теплового бурового снаряда для экологически чистого бурения и вскрытия подледникового озера представлена на рис. 1.

Цилиндрическая часть тепловой буровой коронки с конусообразной нижней частью формирует зазор для отвода воды, образовавшейся при плавлении льда. Внутри трубопровода циркулирует нагретый теплоноситель с целью поддержания образовавшейся в скважине талой воды в жидком состоянии в условиях окружающего льда с низкой температурой. Таким образом, в отличие от других способов бурения льда, буровая жидкость протекает в герметичном трубопроводе и не контактирует со стенками скважины. Роль заливочной жидкости, удерживающей стенки скважины от смыкания под воздействием горного давления в условиях глубокого бурения, выполняет вода, образовавшаяся в результате плавления льда.

Схема тепловой буровой установки приведена на рис. 2. Циркуляция теплоносителя в герметичном контуре, который включает нагреватель и гибкий трубопровод типа «труба в трубе», осуществляется гидравлическим насосом. Гибкий трубопровод с тепловой буровой коронкой на конце по мере углубления скважины подается в нее через шкив с катушки, расположенной на поверхности. Перед погружением в скважину комбинированный тепловой буровой снаряд в очистной камере проходит механическую очистку внешней поверхности и биологическую очистку с помощью ультрафиолетового излучателя. Для сбора вытесненной тепловым буровым снарядом из скважины воды в фирне предусмотрено углубление.

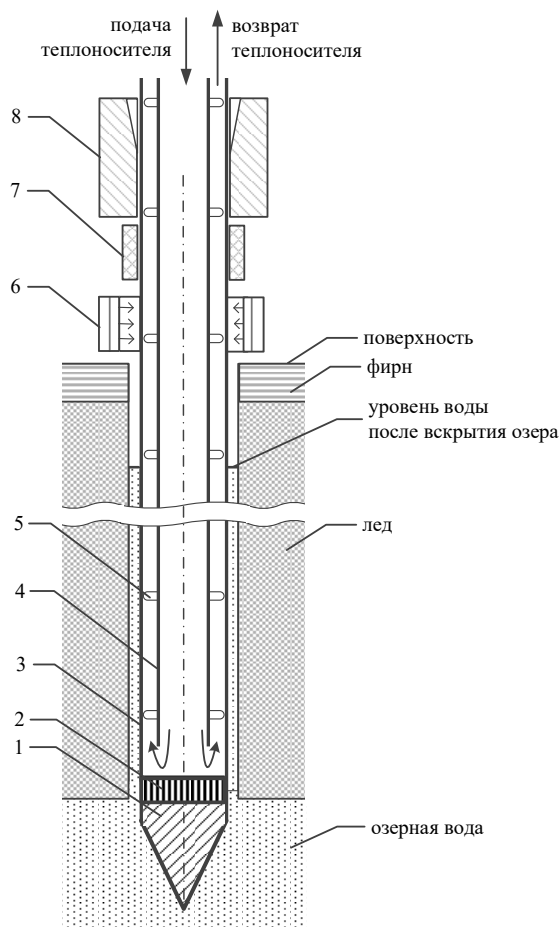


Рис. 1. Принципиальная схема

комбинированного теплового бурового снаряда:

- 1 — тепловая буровая коронка с электрическим нагревательным элементом; 2 — стыковочный узел; 3 — наружный гибкий трубопровод; 4 — внутренний гибкий трубопровод; 5 — центрирующие упоры; 6 — ультрафиолетовый излучатель; 7 — устройство для очистки внешней поверхности бурового снаряда; 8 — направляющее устройство

Fig. 1. Schematic diagram of a combined thermal drilling head.
1 — thermal drill head with electric heating element; 2 — docking station, 3 — external flexible tube; 4 — internal flexible tube; 5 — centering supports; 6 — ultraviolet emitter; 7 — device for cleaning the outer surface of a drill string; 8 — guide device

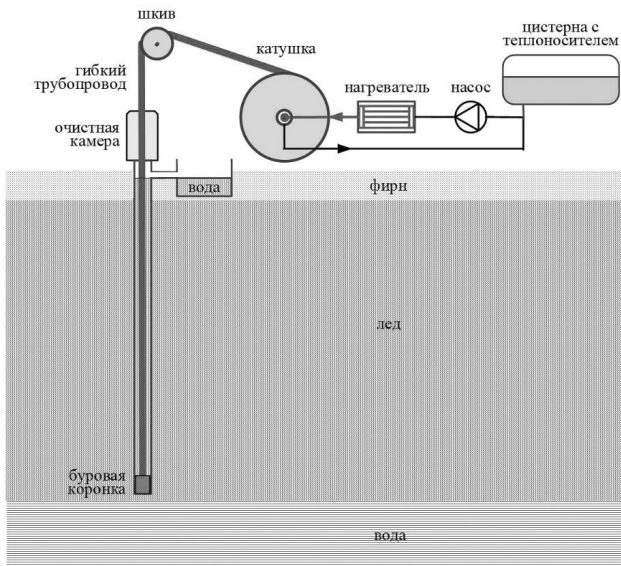


Рис. 2. Принципиальная схема тепловой буровой установки
Fig. 2. Schematic diagram of a thermal drilling unit

Результаты расчета процесса бурения

Расчет процесса бурения скважины комбинированным тепловым снарядом к озеру Восток позволил определить необходимую тепловую мощность буровой установки и параметры бурения [17]. Толщина ледника над озером в месте предполагаемого бурения скважины составляет 3758 м. Слой фирна у поверхности рассматривался как сплошной лед. В качестве теплоносителя использовалась силиконовая жидкость марки ПМС-2 с вязкостью 2 мм²/с при температуре 25 °С. Температура ледника по данным измерений, проведенных в скважине над озером в период 45-й РАЭ, приведена на рис. 3, где –2,8 °С — температура около границы с водой, а –57,5 °С — температура льда у поверхности. Температура плавления льда зависит от давления в глубине ледника. В расчете учитывалась зависимость теплофизических свойств льда и теплоносителя от температуры.

Длина трубопровода в расчете принята равной толщине ледника. На поверхности гибкий трубопровод раз-

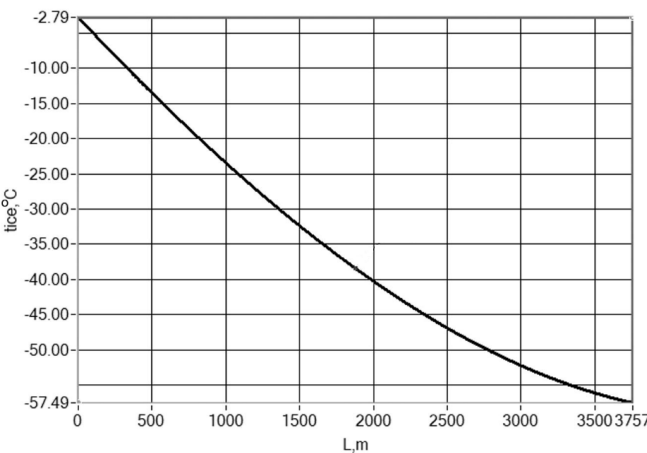


Рис. 3. Температура ледника над озером Восток
Fig. 3. Glacier temperature over Lake Vostok

Таблица 1
Расчетные параметры бурения ледника над озером Восток

Table 1
Calculated parameters for glacier drilling over Lake Vostok

Толщина ледника (глубина скважины), м	3758
Диаметр проходки, м	0,15
Теплоноситель	ПМС-2
Расход теплоносителя, кг/с	6,80
Температура теплоносителя на входе, °С	95,0
Температура теплоносителя в забое на глубине 3758 м, °С	14,0
Температура теплоносителя на выходе, °С	25,3
Температура воды на выходе из скважины, °С	0,9
Тепловая мощность нагревателя буровой коронки, кВт	96
Тепловая мощность потока теплоносителя, кВт	900
Тепловые потери в сторону льда, кВт	547
Полное гидравлическое сопротивление гибкого трубопровода, МПа	8,57
Время бурения скважины, ч	72
Диаметр скважины у поверхности, м	0,157
Объем скважины, м ³	72,7
Средняя скорость проходки, м/мин	0,87
Удельный расход топлива, л/кВт ч	0,104
Расход топлива на бурение скважины, м ³	7,47

мещается на катушке диаметром 2,2 м. Диаметр внешнего гибкого трубопровода составляет 140×5 мм, диаметр внутреннего равен 70×5 мм. Коэффициент теплопроводности материала трубопровода принят равным 0,26 Вт/(м·К) [18].

Результаты расчета бурения скважины к озеру Восток приведены в табл. 1. Для проходки скважины глубиной 3758 метров и диаметром 0,15 м при мощности буровой коронки равной 96 кВт потребуется 72 ч. Теплоноситель с расходом 6,8 кг/с поступает во внутренний трубопровод с температурой 95 °С и постепенно охлаждается к забою до температуры 14,0 °С. На выходе из скважины теплоноситель имеет температуру 25,3 °С. Температура воды, которая отводится из скважины равна 0,9 °С. Тепловой поток, вносимый теплоносителем, равен 900 кВт. Гидравлическое сопротивление гибкого трубопровода составляет примерно 8,57 МПа без учета местного сопротивления центрирующих упоров и гидравлического сопротивления трубопроводов и нагревателя на поверхности. При удельном расходе топлива равном расходу при бурении скважин на Южном полюсе на бурение скважины к озеру Восток потребуется 7,47 м³ топлива без учета потерь тепла на поверхности.

Плотность теплового потока со стенки скважины в сторону ледника в зависимости от времени прогрева (бурения) приведена на рис. 4. Кривыми линиями показаны тепловые потоки в зависимости от времени для разных температурных перепадов между температурой стенки скважины и температурой ледникового горизонта с шагом 5 градусов. Время прогрева на каждом горизонте ледника определяется скоростью проходки сква-

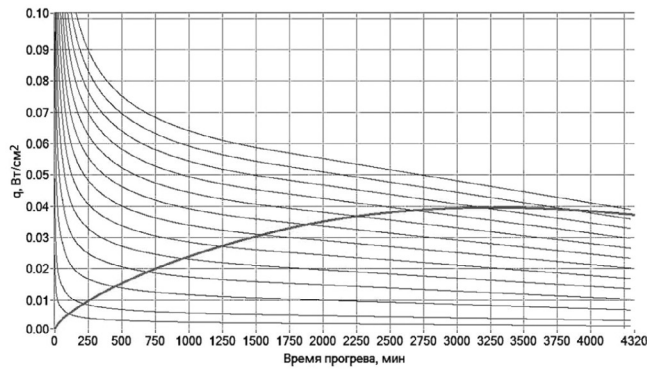


Рис. 4. Тепловой поток в сторону ледника в зависимости от времени прогрева,

где 0 мин — граница с водой, 4320 мин — поверхность

Fig. 4. Heat flow towards the glacier depending on the warming up time, where 0 min — the border with water, 4320 min — the surface

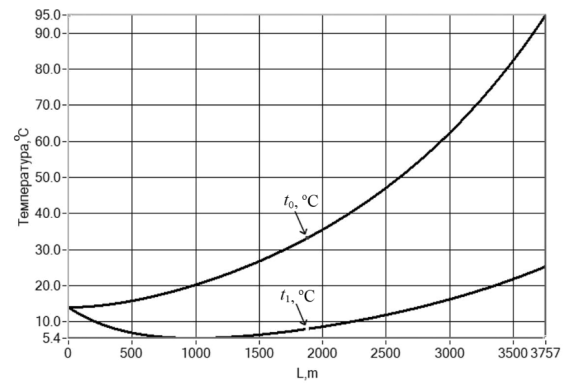


Рис. 5. Температура теплоносителя на опускном участке гибкого трубопровода (t_0) и на подъемном участке (t_1)

Fig. 5. Fluid temperature at the downstream section of the flexible pipeline (t_0) and at the upstream section (t_1)

жины. Часть скважины, находящаяся у поверхности, имеет наибольшее время прогрева и наибольший температурный перепад вследствие низкой температуры льда (см. рис. 3).

Распределение температуры теплоносителя по длине трубопровода показано на рис. 5. Распределение линейных тепловых потоков в скважине представлено на рис. 6. От трубопровода с теплоносителем, имеющим температуру t_1 , поступает линейный тепловой поток q_1 . Часть этого теплового потока рассеивается в леднике (q_{dice}), а оставшаяся часть производит плавление льда на стенке скважины (q_{melt}) и подогревает восходящий поток воды. Температура стенки скважины соответствует температуре плавления льда.

Несмотря на то, что основная задача циркуляции нагретого теплоносителя в трубопроводе заключается

в том, чтобы не допустить замерзания образовавшейся при бурении воды, полностью избежать плавления льда на стенках скважины не удастся. По этой причине диаметр скважины у поверхности на 7 мм больше, чем в забое. Если учесть, что температура льда в верхней части скважины ниже и образование льда на поверхности стенок скважины после извлечения бурового снаряда будет происходить интенсивнее, то увеличенный диаметр является положительным моментом.

Отдельно был выполнен расчет проходки фирна толщиной 200 м. При проходке фирна комбинированным тепловым буровым снарядом с температурой теплоносителя на входе 95 °C, образовавшаяся в скважине вода нагревается теплоносителем до 7 °C и проникает в фирн, что приведет к формированию в нем ледяной трубы с непроницаемыми стенками. Таким образом, использование комбинированного теплового бурового снаряда не требует установки в фирн обсадной колонны.

Дополнительно проведенные расчеты показали, что скважина к озеру Восток может быть пробурена комбинированным тепловым снарядом с большим диаметром буровой коронки. При этом возрастает время бурения и общий расход топлива. Так, например, для бурения скважины диаметром 250 мм расход топлива без учета тепловых потерь на поверхности составит 17,2 м³, а время бурения увеличится до ~ 7 сут при использовании буровой коронки мощностью 110 кВт. Тепловая мощность, вносимая теплоносителем, составит 838 кВт. Другие параметры остаются близкими к тем, которые приведены в табл. 1.

После проникновения теплового бурового снаряда в озеро уровень воды в скважине понизится до гидрологического уровня и вода, образовавшаяся из аккреционного льда, вернется в озеро. При извлечении бурового снаряда его объем будет замещен в скважине водой, поступившей из озера. К стыковочному узлу гибкого трубопровода с циркулирующим теплоносителем вместо тепловой буровой коронки могут присоединяться научные приборы или пробоотборники для последующего опускания в скважину и проведения исследований внутри озера.

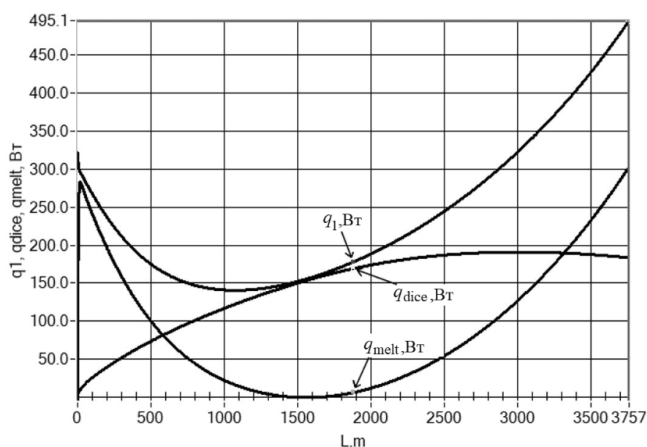


Рис. 6. Линейные тепловые потоки в скважине:

q_1 — тепловой поток, поступающий от теплоносителя;

q_{dice} — тепловой поток, рассеивающийся в леднике;

q_{melt} — тепловой поток, производящий плавление льда

Fig. 6. Linear heat flows in a borehole:

q_1 — heat flow from the fluid; q_{dice} — heat flow dissipated in the glacier; q_{melt} — heat flow producing ice melting

Проведем сравнение параметров бурения скважины к озеру Восток с основными характеристиками тепловых установок для бурения ледников в Антарктиде. В качестве примера приведем бурение горячей водой на Южном полюсе. Для создания нейтринного детектора там было пробурено 86 скважин. Скважины имели глубину 2500 м и диаметр 60 см. Температура воды равнялась 88 °С, расход составлял 12,7 кг/с. Подача горячей воды в скважину производилась через гибкий трубопровод под давлением 7,6 МПа. Среднее время бурения одной скважины составило 30 часов. Установленная тепловая мощность нагревателей равнялась 4,7 МВт. Расход топлива на бурение одной скважины составил 21 м³ [19]. Установка для бурения скважины глубиной 3280 метров и диаметром 36 см к озеру Ellsworth имела тепловую мощность 1,5 МВт. Горячая вода с расходом 3,5 кг/с и температурой 90 °С подавалась в скважину через гибкий трубопровод под давлением 13,6 МПа. Расчетное время бурения оценивалось в 3 суток. Из-за технических неполадок и перерасхода топлива вскрыть озеро не удалось [20].

Литература

1. Васильев Н. И., Дмитриев А. Н., Блинов П. А. Бурение глубокой скважины на российской антарктической станции Восток. // Вестник ОНЗ РАН. 2012. Т. 4. С. 1–6.
2. Shturmakov A. J., Lebar D. A., Bentley Ch. R. DISC drill and replicate coring system: a new era in deep ice drilling engineering. // *Ann. Glaciol.* 2014. V. 55. Iss. 68. P. 189–198.
3. Mason W. P., Shturmakov A. J., Johnson J. A. et al. A new 122mm electromechanical drill for deep ice-sheet coring (DISC): 2. Mechanical design. // *Ann. Glaciol.* 2007. V. 47. P. 35–40.
4. Alemany O., Chappellaz J., Triest J. et al. The SUBGLACIOR drilling probe: concept and design. // *Ann. Glaciol.* 2014. V. 55. Iss. 68. P. 233–242.
5. Alemany O., Talalay P., Boissonneau P. et al. The SUBGLACIOR drilling probe: hydraulic considerations. // *Ann. Glaciol.* 2020. P. 1–12.
6. Duphil R., Possenti Ph., Piard L. A new leak-tight borehole casing at Dome Concordia station, Antarctica, for the SUBGLACIOR project. // *Ann. Glaciol.* 2014. V. 55. Iss. 68. P. 351–354.
7. Goodge J. W., Severinghaus J. P. Rapid Access Ice Drill: a new tool for exploration of the deep Antarctic ice sheets and subglacial geology. // *J. Glaciol.* 2016. V. 62. Iss. 236. P. 1049–1064.
8. Tulaczyk S., Mikucki J. A., Siegfried M. R. et al. WISSARD at Subglacial Lake Whillans, West Antarctica: scientific operations and initial observations. // *Ann. Glaciol.* 2014. V. 55. Iss. 65. P. 1–8.
9. Schwander J., Marending S., Stocker T. F. et al. RADIX: a minimal-resources rapid-access drilling system. // *Ann. Glaciol.* 2014. V. 55. Iss. 68. P. 34–38.
10. Масолов В. Н. и др. Геофизические исследования подледникового озера Восток в восточной Антарктиде. Доклады Академии Наук. 2001, том 379, № 5, с. 680–685.
11. Tikku A. A. et al. Ice flow field over Lake Vostok. *Earth and Planetary Science Letters*. 2004. 227 (3–4). P. 249–261.
12. Petit J., Alekhina I., Bulat S. Exploring a Subglacial Lake and Searching for Life in an Extreme Environment. *Lectures in Astrobiology*. 2005. P. 227–288.

Заключение

Результаты расчета процесса бурения льда с помощью комбинированного теплового бурового снаряда демонстрируют возможность бурения глубокой скважины к озеру Восток за несколько суток. Конструкция бурового снаряда исключает контакт циркулирующего теплоносителя с водой и стенками скважины, что позволит выполнить экологически чистое проникновение в озеро. Вода, образовавшаяся в результате плавления льда тепловым снарядом, предотвращает смыкание стенок скважины под действием горного давления. Скважина для длительного использования после завершения бурения может заполняться гидрофобной незамерзающей экологически чистой силиконовой жидкостью.

Новая технология бурения льда открывает возможность исследования реликтового озера с целью поиска жизни в экстремальных условиях и позволит разместить в озере детектор нейтринного телескопа для регистрации космических нейтрино сверхвысоких энергий.

References

1. Vasiliev N. I., Dmitriev A. N., Blinov P. A. Drilling a deep borehole at the Russian Antarctic station Vostok. *Vestnik ONZ RAS*. 2012. V. 4. P. 1–6. (in Russian)
2. Shturmakov A. J., Lebar D. A., Bentley Ch. R. DISC drill and replicate coring system: a new era in deep ice drilling engineering. *Ann. Glaciol.* 2014. V. 55. Iss. 68. P. 189–198.
3. Mason W. P., Shturmakov A. J., Johnson J. A. et al. A new 122mm electromechanical drill for deep ice-sheet coring (DISC): 2. Mechanical design. *Ann. Glaciol.* 2007. V. 47. P. 35–40.
4. Alemany O., Chappellaz J., Triest J. et al. The SUBGLACIOR drilling probe: concept and design. *Ann. Glaciol.* 2014. V. 55. Iss. 68. P. 233–242.
5. Alemany O., Talalay P., Boissonneau P. et al. The SUBGLACIOR drilling probe: hydraulic considerations. *Ann. Glaciol.* 2020. P. 1–12.
6. Duphil R., Possenti Ph., Piard L. A new leak-tight borehole casing at Dome Concordia station, Antarctica, for the SUBGLACIOR project. *Ann. Glaciol.* 2014. V. 55. Iss. 68. P. 351–354.
7. Goodge J. W., Severinghaus J. P. Rapid Access Ice Drill: a new tool for exploration of the deep Antarctic ice sheets and subglacial geology. *J. Glaciol.* 2016. V. 62. Iss. 236. P. 1049–1064.
8. Tulaczyk S., Mikucki J. A., Siegfried M. R. et al. WISSARD at Subglacial Lake Whillans, West Antarctica: scientific operations and initial observations. *Ann. Glaciol.* 2014. V. 55. Iss. 65. P. 1–8.
9. Schwander J., Marending S., Stocker T. F. et al. RADIX: a minimal-resources rapid-access drilling system. *Ann. Glaciol.* 2014. V. 55. Iss. 68. P. 34–38.
10. Masolov V. N. et al. Geophysical investigation of the sub-ice lake Vostok in East Antarctica. *Doklady Akademii Nauk*. 2001, V. 379, No. 5, P. 680–685. (in Russian)
11. Tikku A. A. et al. Ice flow field over Lake Vostok. *Earth and Planetary Science Letters*. 227. 2004. P. 249–261.
12. Petit J., Alekhina I., Bulat S. Exploring a Subglacial Lake and Searching for Life in an Extreme Environment. *Lectures in Astrobiology*. 2005. P. 227–288.

13. Lipenkov V. et al. Characterization of subglacial Lake Vostok as seen from physical and isotope properties of accreted ice. *Phil. Trans. R. Soc. A* 374: 20140303.
14. Захаров А. А., Соловей В. А. Проблемы изучения антарктического озера Восток через ледовую скважину. // Вестник Международной академии холода. 2018. № 4. С. 3–9.
15. Захаров А. А. Концепция детектора сверхбольшого объема для высокоэнергетических нейтрино. Препринт НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ 3077. Гатчина, 2024. 45 с.
16. Способ бурения и вскрытия подледниковых озер: патент РФ на изобретение № 2825375 / А. А. Захаров; 26.08.2024.
17. Захаров А. А., Колхидашвили М. Р. Экологически чистая технология бурения и проникновения в подледниковое озеро Восток для проведения фундаментальных научных исследований. Препринт НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ 3075. Гатчина, 2023. 28 с.
18. Greenler L., Benson T., Cherwinka J. et al. Modeling hole size, lifetime and fuel consumption in hot-water ice drilling. // *Ann. Glaciol.* 2014. V. 55. Iss. 68. P. 115–123.
19. Benson T., Cherwinka J., Duvernois M. et al. IceCube Enhanced Hot Water Drill functional description. // *Ann. Glaciol.* 2014. V. 55. Iss. 68. P. 105–114.
20. Siegert M. J., Makinson K., Blake D. et al. An assessment of deep hot-water drilling as a means to undertake direct measurement and sampling of Antarctic subglacial lakes: experience and lessons learned from the Lake Ellsworth field season 2012/13. // *Ann. Glaciol.* 2014. V. 55. Iss. 65. P. 59–73.
13. Lipenkov V. et al. Characterization of subglacial Lake Vostok as seen from physical and isotope properties of accreted ice. *Phil. Trans. R. Soc. A* 374: 20140303.
14. Zakharov A. A., Solovey V. A. The study of Antarctic Lake Vostok through ice borehole. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2018. No 4. p. 3–9. (in Russian)
15. Zakharov A. A. The concept of an ultra-large volume detector for high-energy neutrinos. Preprint NRC «Kurchatov Institute» — PNPI. No. 3077. 2024. 45 p. (in Russian)
16. Method of drilling and access to subglacial lakes: patent of the Russian Federation for the invention № 2825375 / Zakharov A. A.; 26.08.2024.
17. Zakharov A. A., Kolkhidashvili M. R. Environmentally friendly technology of drilling and penetration into the subglacial Lake Vostok for fundamental scientific research. Preprint NRC «Kurchatov Institute» — PNPI. No. 3075. 2023. 28 p. (in Russian)
18. Greenler L., Benson T., Cherwinka J. et al. Modeling hole size, lifetime and fuel consumption in hot-water ice drilling. *Ann. Glaciol.* 2014. V. 55. Iss. 68. P. 115–123.
19. Benson T., Cherwinka J., Duvernois M. et al. IceCube Enhanced Hot Water Drill functional description. *Ann. Glaciol.* 2014. V. 55. Iss. 68. P. 105–114.
20. Siegert M. J., Makinson K., Blake D. et al. An assessment of deep hot-water drilling as a means to undertake direct measurement and sampling of Antarctic subglacial lakes: experience and lessons learned from the Lake Ellsworth field season 2012/13. *Ann. Glaciol.* 2014. V. 55. Iss. 65. P. 59–73.

Сведения об авторе

Захаров Аркадий Анатольевич

К. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник
Отделения перспективных разработок Национального
исследовательского центра «Курчатовский институт» —
ПИЯФ, 188300, Ленинградская обл.,
г. Гатчина, Орлова Роша, 1, arcady.zakharov@gmail.com

Information about author

Zakharov Arcady A.

PhD, Leading Researcher at the Department of Advanced
Development of Petersburg Nuclear Physics Institute
NRC «Kurchatov Institute»,
Russia, 188300, Gatchina, Orlova roshcha, 1,
arcady.zakharov@gmail.com



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»

ИНТЕРАГРОМАШ & АГРОТЕХНОЛОГИИ

26–28 февраля 2025 г.

РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ «ИНТЕРАГРОМАШ»:

- Сельскохозяйственная техника и запчасти
- Автоматизация

РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ «АГРОТЕХНОЛОГИИ»:

- Растениеводство
- Оборудование для хранения и переработки сельхозпродукции
- Животноводство
- Оборудование для животноводства
- Услуги для АПК

Организатор:

КВЦ «ДонЭкспоцентр»
тел.: (863) 268-77-68

Место проведения:

КВЦ «ДонЭкспоцентр»
г. Ростов-на-Дону, пр. М. Нагибина, 30

Руководитель проекта – Жадан Ольга

тел.: 8-863-268-77-86

моб: 8-918-544-41-20

e-mail: master@donexpocentre.ru

<http://www.interagromash.net/index.html>