Научная статья

УДК 622.243.23

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-333-343>

Устройство для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением скважин во льду

Данил Васильевич Сербин^a, Андрей Николаевич Дмитриев^b,

Николай Иванович Васильев^c

^{a-c}Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Сербин Данил Васильевич, serbin_dv@pers.spmi.ru

Резюме. Авторами рассматривается новая технология вскрытия подледниковых водоемов, обеспечивающая экологическую чистоту проведения геолого-разведочных работ, в основу которой заложены результаты первых вскрытий подледникового озера Восток в Антарктиде (февраль 2012 года и январь 2015 года). Первоочередной целью дальнейших исследований подледникового озера Восток является взятие чистых проб озерной воды и донных отложений, для этого необходимо прямое проникновение в озеро. Существует ряд условий, без соблюдения которых невозможно дальнейшее проведение исследований озера с использованием скважины чистого доступа на буровом комплексе «Восток». В статье обобщены главные результаты, в том числе технологические и технические решения, которые защищены патентом Российской Федерации. Подробно рассмотрено новое устройство для бурения плавлением с одновременным расширением ледовой скважины. Данное устройство объединяет два технологических процесса: бурение – за счет контактного плавления, а также увеличение диаметра скважины – за счет создания вихревого потока постоянно подогреваемого теплоносителя в призабойной зоне. Тепловой способ разрушения льда обеспечивает экологическую чистоту процесса вскрытия подледниковых водоемов и является приоритетным методом, выгодно отличающимся от существующих. Устройство получило название «тепловой буровой снаряд-расширитель». Во время сезонных работ 64-й Российской Антарктической экспедиции были проведены стендовые испытания такого устройства ТБСР 132/400, результаты которых подтвердили, что оно способно обеспечить бурение диаметром 132 мм с одновременным расширением до 400 мм.

Ключевые слова: Антарктида, подледниковое озеро Восток, термобуровой снаряд на грузонесущем кабеле, бурение плавлением, бурение льда

Для цитирования: Сербин Д. В., Дмитриев А. Н., Васильев Н. И. Устройство для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением скважин во льду // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 3. С. 333–343. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-333-343>.

Original article

Device for fusion drilling with simultaneous or follow-up reaming of wells in ice

Danil V. Serbin^a, Andrey N. Dmitriev^b, Nikolay I. Vasiliev^c

^{a-c}Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Corresponding author: Danil V. Serbin, serbin_dv@pers.spmi.ru

Abstract. The paper deals with a new opening technology for subglacial reservoirs, which ensures environmentally friendly geological exploration. The technology is based on the results of the first openings of the subglacial Lake Vostok in Antarctica (February 2012 and January 2015). The primary goal of further studies of the subglacial Lake Vostok is to take clean samples of lake water and bottom sediments, which requires direct penetration into the lake. There is a number of conditions to be met in order to conduct further studies of the lake using a clean access well at the Vostok drilling complex. The article summarizes the main results including technological and engineering solutions protected by the patent of the Russian Federation. A detailed consideration is given to a new device for fusion drilling with simultaneous reaming of an ice hole. This device combines two technological processes: drilling due to contact melting, and an increase in the diameter of the well due to the creation of a vortex flow of a continuously heated coolant in the bottomhole zone. The thermal method of ice breaking ensures the ecological cleanliness when opening subglacial reservoirs and is a priority method that favorably differs from the existing ones. The device was named a “thermal drill reamer” (TDR). During the seasonal work of the 64th Russian Antarctic Expedition bench tests of the TDR 132/400 were carried out, the results of which confirmed that the device is capable to ensure 132 mm drilling with simultaneous reaming up to 400 mm.

Keywords: Antarctica, subglacial Lake Vostok, thermal drill on a load-bearing cable, fusion drilling, ice drilling

For citation: Serbin D. V., Dmitriev A. N., Vasiliev N. I. Device for fusion drilling with simultaneous or follow-up reaming of wells in ice. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(3):333-343. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-333-343>.

Введение

Антарктида – загадочная и малодоступная, под ее льдами – более 400 подледниковых озер [1, 2], которые длительное время находятся в изоляции от окружающей среды и определяются как скопление воды во впадине коренного ложа под ледниками [3, 4]. Такие озера содержат в своих осадках информацию об истории формирования ледников, климатических изменениях и наличии древних форм жизни. Основными направлениями исследований подледниковых водоемов являются изучение биоразнообразия флоры и фауны подобных природных объектов; исследование законов эволюции живых организмов [2, 5], которые на протяжении нескольких миллионов лет не имели контакта с атмосферой; исследование земной коры под ледяным щитом Антарктиды с целью познания ее состава и структуры до начала процесса оледенения южного полярного региона (30–40 млн лет назад); отработка технологий и инженерных решений в земных условиях для их последующего применения в космических исследованиях по поиску живых организмов на других объектах Солнечной системы [3]. Изучение подледниковых водоемов находится в начальной стадии: еще не исследованы вопросы о существовании и разнообразии жизни, а также вопросы, связанные с газовым, изотопным и гидрологическим режимом озер [6]. Найти ответы на большинство поставленных вопросов возможно только при прямом исследовании водоемов, а конкретно – в отобранных пробах озерной воды и донных отложений. Все эти исследования ученым только предстоит провести, и они должны быть выполнены с учетом ряда особых рекомендаций и условий, разработанных международными и национальными организациями, по уровням экологической безопасности проводимых научно-исследовательских работ. В частности, проникновения в подледниковые водоемы должны исключать биологическое, химическое и тепловое загрязнения, а также дестабилизацию газовых гидратов [6, 7].

В настоящее время выделяется три проекта исследования подледниковых водоемов Антарктиды: российский проект проникновения и отбора проб воды и донных отложений озера Восток, проект Великобритании по исследованию озера Элсуорт (*англ.*: Ellsworth) и американский проект по проникновению и отбору проб под ледниковым потоком Вильянс (*англ.*: Whillans Ice Stream) в Западной Антарктиде [6].

Так как для Антарктиды характерны особо осложненные условия, наибольшее распространение получили механический и тепловой способы бурения скважин во льду с применением буровых снарядов на грузонесущем кабеле или с использованием гибкой трубы с наконечником для бурения горячей водой. К сожалению, в настоящее время ни одна разработанная технология бурения скважин сквозь ледниковый массив с последующим вскрытием подледниковых водоемов, обеспечивающая вход в подледниковое пространство, не отвечает требованиям экологической безопасности. Общим риском для всех трех проектов следует считать возможное биологическое загрязнение исследуемых объектов, в то время как остальные риски зависят от используемой технологии проникновения в подледниковую среду и особенностей изучаемых водоемов [8–11]. Так, для проектов с применением технологии бурения горячей водой очевидным является тепловое загрязнение, а также в связи с небольшим периодом времени для технологических операций появляется риск потери бурового и научно-исследовательского оборудования из-за возможного примораживания к стенкам скважины или сужения ствола. Для проектов бурения сквозь ледовый массив колонковыми буровыми снарядами на грузонесущем кабеле, предусматривающих применение низкотемпературной заливочной жидкости, возможным загрязнением является проникновение этой жидкости в подледниковое пространство водоема.

Из всех известных подледниковых озер наибольший интерес для исследования вызы-

вает реликтовое озеро Восток, которое является самым глубоким и самым крупным из подледниковых озер на Земле¹, [2, 13]. Бурение глубокой скважины 5Г на станции «Восток» было начато в 1990 году. В конжеляционном льде на интервале 3620–3666 м выявлено бимодальное распределение кристаллов с разной кристаллографической ориентировкой. Данный характер ориентировки кристаллов не свойственен для озерного льда, что свидетельствует о протекании в озере Восток таких процессов замерзания, которые ранее не наблюдались [14, 15].

В феврале 2012 года российскими учеными было проведено первое вскрытие озера Восток, затем в январе 2015 года осуществлено повторное вскрытие [16–18]. Скважина 5Г заполнена низкотемпературной жидкостью (смесь авиационного топлива ТС-1 и фреона F-141b) в объеме 60 м³. Используемая заливочная жидкость обладает рядом недостатков: имеет высокую проникающую способность (особенно в пористой фирновой зоне и трещиноватых льдах), а также не соответствует современным экологическим требованиям. Как показали результаты работ по вскрытию подледникового озера Восток, при дифференциальном давлении -0,2 МПа вода поднимается в скважину на 30 м в кольцевом зазоре между поверхностью снаряда и стенками скважины и обгоняет его, поднимаясь выше него примерно на 15 м. В процессе подъема воды в кольцевом зазоре происходит активное перемешивание воды с заливочной жидкостью, что приводит к образованию эмульсии. Такая технология вскрытия не соответствует требованиям научного мира по проведению данных геолого-разведочных работ, скважина 5Г, заполненная смесью керосина и фреона, после 30 лет бурения имеет высокий уровень загрязнения, а ее использование для проникновения в озеро Восток недопустимо [19, 20].

Таким образом, дальнейшее исследование озера непозволительно без выполнения ключевых условий: экологической безопасности работ; устойчивости стенок нижней части скважины, заполненной озерной водой; надеж-

ности и безотказности работы всех механизмов и систем устройства доставки научно-исследовательской аппаратуры [21–23].

Материалы и методы исследования

Наиболее целесообразным и эффективным для изучения подледникового озера Восток является бурение новой глубокой скважины чистого доступа на станции «Восток», где в настоящее время ведутся исследования, направленные на отработку технологии вскрытия и поддержания в рабочем состоянии нижнего участка скважины на время изучения подледникового озера, что не только позволит получить абсолютно уникальную информацию по различным научным дисциплинам, но и в немалой степени укрепит престиж России в антарктических исследованиях.

Технология вскрытия подледникового озера Восток. Учеными Санкт-Петербургского горного университета разработана новая технология подготовки скважины, залитой экологически безопасной низкотемпературной жидкостью (полидиметилсилоксановой жидкостью), с последующим вскрытием озера Восток. Разработанная технология предусматривает расширение нижнего участка скважины, что создаст условия для контролируемого подъема озерной воды на высоту до 10 м и позволит существенно снизить колебания уровня воды в скважине при проведении спуско-подъемных операций, а также исключит загрязнение озера при проведении работ и примерзание к стенкам скважины доставочного снаряда с модулем, оснащенным научно-исследовательской аппаратурой, предупредит образование эмульсии во время подъема снаряда.

Технология подготовки скважины с последующим вскрытием подледникового озера Восток включает четыре этапа:

- бурение скважины колонковым электро-механическим снарядом (КЭМС-132) с остановкой на расстоянии 1 м от поверхности озера;

- расширение скважины на 9-метровом участке призабойной зоны механическим рас-

¹ Антарктика. Геоморфологический атлас. СПб.: Карта, 2011. 256 с.

ширителем с периодическим извлечением продуктов бурения (ледовый шлам) на поверхность;

– бурение плавлением последнего метра с одновременным расширением тепловым снарядом без извлечения продуктов бурения (таяя вода) на поверхность;

– вскрытие подледникового озера, калибровка нижнего метрового участка скважины и подогрев озерной воды в скважине (рис. 1).

После вскрытия подледникового озера специальным акустическим научно-исследовательским оборудованием проводится оценка состояния расширенного участка скважины. При удовлетворительном состоянии участка доступа в озеро выполняются намеченные исследования.

Разработанная технология экологически безопасного вскрытия подледникового озера Восток включает увеличение диаметра нижнего участка скважины до 400 мм на высоту до 10 м. Расширение ствола скважины до расчетного диаметра осуществляется с применением механического и теплового расширителей. На втором этапе технологии подготовки скважины на глубине от 10 до 1 м от границы

«лед – озеро» используется механический расширитель, для которого необходимо бурение пилот-скважины стандартным колонковым электромеханическим снарядом (первый этап). Тепловой снаряд (расширитель) используется на третьем этапе бурения последнего метра между скважиной и озером с одновременным расширением скважины за счет создания вихревого потока циркуляционной жидкости (талой воды) с постоянным ее подогревом. Патентный поиск существующих технических средств, предназначенных для увеличения диаметра скважины механическим или тепловым способом, показал, что ни одно из известных устройств не подходит для осуществления разработанной технологии подготовки скважины. В связи с этим возникла необходимость разработки теплового снаряда для бурения плавлением с одновременным расширением скважины во льду. Такой механический расширитель был спроектирован и изготовлен сотрудниками Санкт-Петербургского горного университета и успешно испытан в скважных условиях во время сезона 63-й Российской Антарктической экспедиции.

Рис. 1. Схема вскрытия подледникового озера Восток:

*a – финальная стадия бурения скважины; б – образование расширенного участка скважины;
с – этап расширения термобуровым снарядом; d – момент вскрытия озера
1 – заливочная жидкость; 2 механический расширитель; 3 – тепловой буровой снаряд*

Fig. 1. An opening scheme of the subglacial Lake Vostok:

*a – final stage of well drilling; b – formation of the reamed section of the well;
c – stage of reaming with a thermal drill; d – moment of lake opening
1 – drilling fluid; 2 – mechanical reamer; 3 – thermal drill*

Технические средства для вскрытия подледникового озера должны отличаться высокой надежностью и безотказностью всех механизмов, что достигается за счет использования существующих, а также вновь спроектированных, тщательно проверенных и испытанных узлов бурового снаряда.

Тепловой буровой снаряд должен отвечать следующим техническим требованиям:

- простота и надежность конструкции;
- легкость монтажа и демонтажа снаряда;
- диаметр в транспортном положении – до 132 мм;
- возможность расширения диаметра скважины до 400 мм;
- постоянство диаметра расширенного участка скважины по всей длине;
- скорость бурения плавлением соответствует интенсивности расширения скважины;
- рабочий интервал глубин – до 4000 м;
- потребляемая мощность электроэнергии – до 10 кВт;
- количество токоведущих жил – 6 шт.;
- возможность оперативного контроля и управления параметрами бурения.

Обзор серийно выпускаемых буровых снарядов и расширителей, проведенный с учетом специфики технологии ведения буровых работ и используемого оборудования, показал, что ни один из них не может быть применен при подготовке скважины для проникновения в подледниковое озеро, так как все они не отвечают техническим требованиям.

По результатам обзора поставлена задача: создать скважинный тепловой буровой снаряд-расширитель новой конструкции, взяв за основу уже разработанные и испытанные буровые снаряды на грузонесущем кабеле, которые по своим характеристикам наиболее близки к предъявляемым техническим требованиям.

Конструкция термобурового снаряда для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением ледовой скважины. Тепловой снаряд предназначен для бурения плавлением скважин во льду сплошным забоем с одновременным или последовательным их расширением. За конструктивные основы взяты созданные и успешно зарекомендовавшие себя буровые тепловые снаряды

ТЭЛГА-14М, ТБЗС, ТБЖС, СГПУ [3]. Основным отличием теплового снаряда для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением скважин от существующих снарядов является использование рабочего органа с выполненным в нем коллектором и гидравлическими каналами, который позволяет объединить технологические процессы бурения и расширения скважины, а также отдельные системы электрического нагрева циркуляционного отсека и рабочего органа.

Тепловой снаряд для бурения плавлением сплошным забоем с одновременным или последующим расширением скважин состоит из пяти отсеков: кабельного замка 1, электрического отсека 2, насосного отсека 3, циркуляционного отсека 4 и рабочего органа 5 (рис. 2).

Рис. 2. Принципиальная схема термобурового снаряда

(рисунок выполнен без соблюдения масштаба)

Fig. 2. Schematic diagram of a thermal drill
(the figure is made not to the scale)

Для крепления такого снаряда к грузонесущему кабелю используется стандартный кабельный замок, входящий в используемые буровые снаряды. В электрическом отсеке выполняется соединение токоведущих жил грузонесущего кабеля с энергопотребителями снаряда. Также в нем закреплен датчик осевой нагрузки на забой и электронный блок для оперативного управления снарядом.

Процесс бурения льда осуществляется контактным плавлением (кондуктивным теплообменом) сплошным забоем за счет передачи тепловой энергии от нагревателя ледовому массиву, а процесс расширения – за счет

создания вихревого потока горячей жидкости в призабойной зоне, при этом разрушение льда осуществляется за счет гидродинамического воздействия на стенки скважины и конвективного теплообмена при принудительной циркуляции жидкости.

Термобуровой снаряд для бурения плавлением сплошным забоем с одновременным или последующим расширением ледовых скважин [24] включает кабельный замок 9 для крепления его на грузонесущем кабеле 10, цилиндрический корпус 2, в нижней части которого выполнены заборные горизонтальные окна 11. В корпусе 2 размещен насосный отсек 7 с установленным в нем насосом 8. Нижняя часть насосного отсека 7 соединена с центральной двойной трубой 3, состоящей из наружной водоподъемной трубы 5 и внутренней водонагнетательной трубы 4, на внешней стороне которой закреплен нагревательный элемент 6, представляющий собой нагревательный кабель КНМС НХ (рис. 3).

Формирующий забой рабочий орган 1 болтовыми соединениями жестко крепится к корпусу 2. Рабочий орган 1 выполнен в форме цилиндра с закругленными нижними краями и сплошной торцевой поверхностью. Внутри рабочего органа 1 выполнен коллектор 12. В нижней части рабочего органа 1 из коллектора 12 выполнены дугообразные каналы 14, выходящие на поверхность рабочего органа 1, расположенные диаметрально противоположно относительно друг друга. Внутри рабочего органа 1 жестко закреплен кольцевой нагревательный элемент 13 [25].

Дугообразные каналы 14 малого диаметра (4–5 мм) выполнены таким образом (см. рис. 3), что подвод нагретого теплоносителя 15 к стенкам скважины 16 осуществляется тангенциально. Наличие коллектора 12 и выполненные в нем дугообразные каналы 14 способствуют созданию регулируемого вихревого потока 17 и равномерной подаче нагретого теплоносителя 15 к стенкам скважины 16, что обеспечивает постоянство диаметра по всем радиальным направлениям [25].

Принцип работы термобурового снаряда для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением ледовой скважины. Работа термобурового снаряда

Рис. 3. Схема термобурового снаряда для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением скважин:

a – общий вид устройства;

b – рабочий орган, вид сверху

Fig. 3. Diagram of a thermal drill for fusion drilling with simultaneous or subsequent well reaming:

a – general view of the device;

b – working body, top view

осуществляется следующим образом. После постановки теплового снаряда на забой подается напряжение на кольцевой нагревательный элемент 13 рабочего органа 1 при выключенном насосе 8, при этом происходит контактное плавление льда. Когда талая вода в процессе углубки снаряда перекроет заборные окна 11 над верхним торцом рабочего органа

1, включаются насос 8 и нагревательный элемент 6 центральной двойной трубы 3. Вода поднимается по водоподъемной трубе 5, при этом нагревается за счет отдачи тепловой энергии нагревательным элементом 6 и попадает в насос 8, после чего подается насосом 8 в водонагнетательную трубу 4, из которой попадает в коллектор 12, забирая часть тепловой энергии от рабочего органа 1, а затем выходит в затрубное пространство через дугообразные каналы 14. Подогретая вода, выходя из каналов 14, оплавляя стенки скважины 16, при этом тепловая энергия затрачивается на прогрев льда до температуры фазового перехода и его плавление. После чего вода попадает в снаряд через заборные окна 11 и цикл повторяется. Таким образом осуществляется призабойная циркуляция теплоносителя 15, при этом происходит его постоянный нагрев.

Ориентация именно дугообразных каналов 14 обеспечивает закручивание потока теплоносителя 15 вокруг оси скважины по типу «сегнерова кольца», что приводит к равномерному воздействию и распространению гидродинамических и тепловых потоков в призабойной зоне.

При выключенном насосе 8 устройством можно производить только бурение плавлением скважины без ее расширения, в этом случае скорость проходки достигает максимальных значений, так как затраты тепловой энергии направлены на процесс бурения. При стационарном размещении теплового снаряда на заданной глубине можно производить образование локальной полости (каверны) минимальной по высоте и максимальной по простираанию.

Результаты исследования и их обсуждение

Интенсивность расширения скважины во время бурения зависит от температуры ледника, мощности нагревательных элементов и производительности насоса. При известных значениях названных параметров объем расплавленного льда за единицу времени определяется по разности температур выходящего и входящего теплоносителя. Температура выходящего потока не меняется во

времени, а температура входящего теплоносителя зависит от диаметра расширения и определяется аналитически. Производительность насоса влияет на время плавления, форму и объем участка расширения, поскольку от интенсивности циркуляции теплоносителя в снаряде зависит его температура. Поэтому во внимание принимается не температура входящего потока, а разность температур.

На данную конструкцию теплового бурового снаряда получен патент на изобретение RU № 2700143 C1.

При проведении сезонных буровых работ 64-й Российской Антарктической экспедиции была собрана и испытана модель теплового снаряда для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением скважин. Первые экспериментальные исследования показали, что разработанная конструкция теплового бурового снаряда отвечает заявленным техническим требованиям и он способен осуществлять процесс бурения с одновременным расширением скважины во льду. Также испытания выявили и недостатки собранной модели: потери тепла в рабочем органе и циркуляционном отсеке; низкое давление насоса; неравномерность нагрева поверхности рабочего органа. В связи с этим сотрудниками Санкт-Петербургского горного университета доработана модель данного бурового снаряда, а в будущих сезонных работах Российской Антарктической экспедиции будут проведены его стендовые и скважинные испытания.

Заключение

Разработанный тепловой снаряд для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением ледовых скважин соответствует всем требованиям технического задания, так как обеспечивает экологическую безопасность при выполнении вышеуказанных геолого-разведочных работ.

Основными достоинствами данного устройства являются способность одновременно со стабильной проходкой скважины производить расширение ее сечения, вести образование локальных полостей, а также то, что оно надежно в работе, имеет низкое

энергопотребление и простую конструкцию. При его использовании достигается снижение энергоемкости процесса бурения с одновременным расширением за счет более равномерного распределения гидравлических и тепловых потоков по площади как забоя, так и стенок скважины, а также за счет принудительной призабойной циркуляции теплоносителя.

Создание вихревого потока теплоносителя позволяет образовывать стенки скважины постоянного диаметра на всем участке бурения при постоянной скорости бурения. Эти преимущества повышают общую технологическую культуру данного процесса и позволяют обеспечить реализацию проведения необходимых геолого-разведочных работ.

Список источников

1. Wright A., Siegert M. J. The identification and physiological setting of Antarctic subglacial lakes: an update based on recent geophysical data, in Antarctic Subglacial Aquatic Environments // Proceedings of the Chapman Conference on the Exploration and Study of Antarctic Subglacial Aquatic Environments. Washington: AGU, 2011. P. 9–26.
2. Siegert M. J., Ross N., Le Brocq A. M. Recent advances in understanding Antarctic subglacial lakes and hydrology // Philosophical Transactions of the Royal Society. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2016. Vol. 374. Iss. 2059. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0306>.
3. Васильев Н. И., Большунов А. В., Дмитриев А. Н., Подоляк А. В., Сербин Д. В. Спускоподъемное устройство с полиспастной системой для исследования подледникового озера «Восток» // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 9. Ч. 2. С. 137–140. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.51.062>.
4. McKay R. M., Barrett P. J., Levy R. S., Naish T. R., Golledge N. R., Pyne A. Antarctic Cenozoic climate history from sedimentary records: ANDRILL and beyond // Philosophical Transactions of the Royal Society. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2016. Vol. 374. Iss. 2059. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0301>.
5. Bulat S. A., Alekhina I. A., Lipenkov V. Y., Lukin V. V., Marie D., Petit J. R. Cell concentrations of microorganisms in glacial and lake ice of the Vostok ice core, East Antarctica // Microbiology. 2009. Vol. 78. Iss. 6. P. 808–810. <https://doi.org/10.1134/S0026261709060216>.
6. Алехина И. А., Васильев Н. И., Липенков В. Я. Проблемы защиты окружающей среды и экологического мониторинга в проектах изучения подледниковых озер Антарктиды // Лед и снег. 2012. Т. 52. № 4. С. 104–114. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-4-104-114>.
7. Онишин В. П. Комплекс технических средств для изыскательских работ на шельфе арктических морей // Записки Горного института. 2012. Т. 197. С. 46–49.
8. Fricker H. A., Powell R., Priscu J., Tulaczyk S., Anandakrishnan S., Christner B., et al. Siple Coast subglacial aquatic environments: the Whillans Ice Stream Subglacial Access Research Drilling (WISSARD) project // Proceedings of the Chapman Conference on the Exploration and Study of Antarctic Subglacial Aquatic Environments. Washington: AGU, 2011. P. 199–220.
9. Christner B. C., Royston-Bishop G., Foreman C. M., Arnold B. R., Tranter M., Welch K. A., et al. Limnological conditions in Subglacial Lake Vostok, Antarctica // Limnology and Oceanography. 2006. Vol. 51. Iss. 6. P. 2485–2501. <https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.6.2485>.
10. Methodology for clean access to the subglacial environment associated with the Whillans Ice Stream // ATCM IP 72. 34 Antarctic Treaty Consultative Meeting. Buenos Aires, 2011.
11. Priscu J. C., Powell R. D., Tulaczyk S. Probing subglacial environments under the Whillans Ice Stream // Eos (Transactions, American Geophysical Union). 2010. Vol. 91. Iss. 29. P. 253–254. <https://doi.org/10.1029/2010EO290002>.
12. Масолов В. Н., Попов С. В., Лукин В. В., Попков А. М. Рельеф дна и водное тело подледникового озера Восток, Восточная Антарктида // Доклады Академии наук. 2010. Т. 433. № 5. С. 693–698.
13. Васильев Н. И., Дмитриев А. Н., Блинов П. А. Бурение глубокой скважины на российской антарктической станции «Восток» // Вестник Отделения наук о Земле Российской академии наук. 2012. Т. 4. NZ2001. <https://doi.org/10.2205/2012NZ000111>.
14. Полякова Е. В. Статистическая обработка результатов микроструктурного анализа ледяных кернов из глубоких скважин на станции «Восток» (Центральная Антарктида) // Записки Горного института. 2007. Т. 173. С. 17–19.
15. Полякова Е. В. Структурные особенности льда озера Восток (Центральная Антарктида) // Записки Горного института. 2009. Т. 182. С. 45–47.
16. Lukin V. V., Vasiliev N. I. Technological aspects of the final phase of drilling borehole 5G and unsealing Vostok Subglacial Lake, East Antarctica // Annals of Glaciology. 2014. Vol. 55. Iss. 65. P. 83–89. <https://doi.org/10.3189/2014AoG65A002>.
17. Литвиненко В. С. Уникальные техника и технологии бурения скважин во льдах Антарктиды // Записки Горного института. 2014. Т. 210. С. 5–10.
18. Литвиненко В. С., Васильев Н. И. Разработка породоразрушающего инструмента для бурения скважин во льду // Записки Горного института. 2012. Т. 197. С. 15–20.
19. Липенков В. Я., Лукин В. В., Булат С. А., Васильев Н. И., Екайкин А. А., Лейченков Г. Л. [и др.]. Итоги исследования подледникового озера Восток в период МПГ // Вклад России в Международный полярный год 2007/08: полярная криосфера и воды суши / ред. В. М. Котляков. М. – СПб.: Паулсен, 2011. С. 17–45.
20. Clow G. D., Koci B. R. A fast mechanical access drill for polar glaciology, paleoclimatology, geology, tectonics and biology // Memoirs of National Institute of Polar

Research. 2002. Vol. 56. P. 5–37.

21. Kennicutt M. C., Siegert M. J. Subglacial aquatic environments: a focus of 21st century Antarctic science // Antarctic subglacial aquatic environments / eds. M. Siegert, C. Kennicutt, B. Bindschadler. Washington: AGU, 2011. P. 1–8.

22. Большунов А. В., Васильев Н. И., Дмитриев А. Н., Подоляк А. В., Сербин Д. В., Туркеев А. В. Особенности технологии экологически безопасного вскрытия озера Восток в Антарктиде и технические средства для ее реализации // Бурение в осложненных условиях: материалы Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: ЛЕМА, 2016. С. 13–14.

23. Барков Н. И. Первая скважина на станции Восток // Лед и снег. 2012. № 4. С. 9–11.

24. Пат. № 2700143 С1, Российская Федерация, МПК Е21В7/15. Тепловой снаряд для бурения плавлением / Н. И. Васильев, Д. В. Сербин, А. Н. Дмитриев, А. В. Большунов. Заявл. 15.04.2019; опубл. 12.09.2019. Бюл. № 26.

25. Сербин Д. В., Васильев Н. И., Дмитриев А. Н., Большунов А. В. Тепловой снаряд для бурения плавлением с одновременным расширением ледовых скважин // Новые идеи в науках о Земле: материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. М.: Изд-во МГРИ, 2019. С. 297–300.

References

1. Wright A., Siegert M. J. The identification and physiological setting of Antarctic subglacial lakes: an update based on recent geophysical data, in Antarctic Subglacial Aquatic Environments. *Proceedings of the Chapman Conference on the Exploration and Study of Antarctic Subglacial Aquatic Environments*. Washington: AGU; 2011. p.9–26.

2. Siegert M. J., Ross N., Le Brocq A. M. Recent advances in understanding Antarctic subglacial lakes and hydrology. *Philosophical Transactions of the Royal Society. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2016;374(2059). <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0306>.

3. Vasilev N. I., Bolshunov A. V., Dmitriev A. N., Podoliak A. V., Serbin D. V. Pulling-and-running gear with reeving system for investigations of subglacial lake Vostok. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal*. 2016;9(2):137–140. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.51.062>.

4. McKay R. M., Barrett P. J., Levy R. S., Naish T. R., Golledge N. R., Pyne A. Antarctic Cenozoic climate history from sedimentary records: ANDRILL and beyond. *Philosophical Transactions of the Royal Society. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2016;374(2059). <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0301>.

5. Bulat S. A., Alekhina I. A., Lipenkov V. Y., Lukin V. V., Marie D., Petit J. R. Cell concentrations of microorganisms in glacial and lake ice of the Vostok ice core, East Antarctica. *Microbiology*. 2009;78(6):808–810. <https://doi.org/10.1134/S0026261709060216>.

6. Alekhina I. A., Vasiliev N. I., Lipenkov V. Y. Environment protection and environment monitoring issues in the projects of subglacial lakes studies in Antarctica. *Led i sneg = Ice and Snow*. 2012;52(4):104–114. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-4-104-114>.

7. Onishchik V. P. Technical equipments for realization investigation works on shelf of arctic seas. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2012;197:46–49. (In Russ.).

8. Fricker H. A., Powell R., Priscu J., Tulaczyk S., Anandakrishnan S., Christner B., et al. Siple Coast subglacial aquatic environments: the Whillans Ice Stream Subglacial Access Research Drilling (WISSARD) project. *Proceedings of the Chapman Conference on the Exploration and Study of Antarctic Subglacial Aquatic Environments*.

Washington: AGU; 2011. p.199–220.

9. Christner B. C., Royston-Bishop G., Foreman C. M., Arnold B. R., Tranter M., Welch K. A., et al. Limnological conditions in Subglacial Lake Vostok, Antarctica. *Limnology and Oceanography*. 2006;51(6):2485–2501. <https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.6.2485>.

10. Methodology for clean access to the subglacial environment associated with the Whillans Ice Stream. *ATCM IP 72. 34 Antarctic Treaty Consultative Meeting*. Buenos Aires; 2011.

11. Priscu J. C., Powell R. D., Tulaczyk S. Probing subglacial environments under the Whillans Ice Stream. *Eos (Transactions, American Geophysical Union)*. 2010;91(29):253–254. <https://doi.org/10.1029/2010EO290002>.

12. Masolov V. N., Popov S. V., Lukin V. V., Popkov A. M. Bottom relief and water body of the subglacial Lake Vostok, East Antarctica. *Doklady Akademii nauk*. 2010;433(5):693–698. (In Russ.).

13. Vasiliev N. I., Dmitriev A. N., Blinov P. A. Drilling of a deep bore-hole at Vostok station (East Antarctica). *Vestnik Otdeleniya nauk o Zemle Rossiiskoi akademii nauk*. 2012;4:NZ2001. (In Russ.). <https://doi.org/10.2205/2012NZ000111>.

14. Polyakova E. V. Statistical processing of the results of microstructural analysis of ice cores from deep wells at Vostok station (Central Antarctica). *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2007;173:17–19. (In Russ.).

15. Polyakova E. V. Structural features of the Lake Vostok ice (Central Antarctica). *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2009;182:45–47. (In Russ.).

16. Lukin V. V., Vasiliev N. I. Technological aspects of the final phase of drilling borehole 5G and unsealing Vostok Subglacial Lake, East Antarctica. *Annals of Glaciology*. 2014;55(65):83–89. <https://doi.org/10.3189/2014AoG65A002>.

17. Litvinenko V. S. Unique engineering and technology for drilling boreholes in Antarctic ice. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2014;210:5–10. (In Russ.).

18. Litvinenko V. S., Vasil'ev N. I. Rock-destroying tool development for ice well drilling. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2012;197:15–20. (In Russ.).

19. Lipenkov V. Ya., Lukin V. V., Bulat S. A., Vasil'ev

N. I., Ekaikin A. A., Leichenkov G. L., et al. The results of studying the subglacial Lake Vostok during the international polar year. In: Kotlyakov V. M. (ed.). *Vklad Rossii v Mezhdunarodnyi polyarnyi god 2007/08: polyarnaya kriosfera i vody sushy = Contribution of Russia to the International polar year 2007/08: polar cryosphere and land waters*. Moscow – Saint Petersburg: Paulsen; 2011. p.17–45. (In Russ.).

20. Clow G. D., Koci B. R. A fast mechanical access drill for polar glaciology, paleoclimatology, geology, tectonics and biology. *Memoirs of National Institute of Polar Research*. 2002;56:5–37.

21. Kennicutt M. C., Siegert M. J. Subglacial aquatic environments: a focus of 21st century Antarctic science. In: Siegert M., Kennicutt C., Bindshadler B. (eds.). *Antarctic subglacial aquatic environments*. Washington: AGU; 2011. p.1–8.

22. Bol'shunov A. V., Vasil'ev N. I., Dmitriev A. N., Podolyak A. V., Serbin D. V., Turkeev A. V. Technological features of environmentally safe opening of the Vostok

Lake in Antarctica and technical equipment for its implementation. In: *Burenie v oslozhnennykh usloviyakh: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Drilling in Complicated Conditions: materials of the International scientific and practical conference*. Saint Petersburg: LEMA; 2016. p.13–14. (In Russ.).

23. Barkov N. I. First bore-hole at Vostok station. *Led i sneg = Ice and Snow*. 2012;4:9–11.

24. Vasilev N. I., Serbin D. V., Dmitriev A. N., Bol'shunov A. V. *Thermal shell for melting drilling*. Patent RF, no. 2700143 C1; 2019. (In Russ.).

25. Serbin D. V., Vasil'ev N. I., Dmitriev A. N., Bol'shunov A. V. Thermal drill for fusion drilling with simultaneous expansion of ice wells. *Novye idei v naukakh o Zemle: materialy XIV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = New Ideas in the Earth Sciences: materials of the 14th International scientific and practical conference*. Moscow: Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting; 2019. p.297–300. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors

Сербин Данил Васильевич,
ведущий инженер НЦ «Арктика»,
Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия,
serbin_dv@pers.spmi.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-9855-7178>.
Danil V. Serbin,
Leading Engineer of the Scientific Center Arctic,
Saint-Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, Russia,
serbin_dv@pers.spmi.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-9855-7178>.

Дмитриев Андрей Николаевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры бурения скважин,
Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия,
a2807970@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-4615-3179>.
Andrey N. Dmitriev,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Well Drilling,
Saint-Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, Russia,
a2807970@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-4615-3179>.

Васильев Николай Иванович,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
Санкт-Петербургский горный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия.
Nikolay I. Vasiliev,
Dr. Sci. (Eng.),
Senior Scientific Researcher,
Saint-Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, Russia.

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 01.06.2021; одобрена после рецензирования 02.07.2021; принята к публикации 05.08.2021.

The article was submitted 01.06.2021; approved after reviewing 02.07.2021; accepted for publication 05.08.2021.