

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВАЯ ГЕОЛОГИЯ,
ГЕОФИЗИКА, МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО И ГЕОМЕТРИЯ НЕДР

Обзорная статья

УДК 550.822.7

EDN: NDJVMD

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-3-342-355

Современное состояние технологий колонкового бурения
подледниковых горных породВ.С. Шадрин^{a✉}, В.Я. Климов^b, А.В. Большунов^c^{a-c}Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Резюме. Цель данной работы заключается в представлении обзора проектов колонкового бурения подледниковых горных пород на островах Арктики и в Антарктиде, выполненных специалистами России, Соединенных Штатов Америки, Дании и Китая. Анализ результатов отечественных и зарубежных проектов позволил выявить геолого-технические особенности колонкового бурения подледниковых горных пород, достоинства и недостатки используемых технологий, определить оптимальный тип породоразрушающего инструмента и наметить одно из возможных направлений в совершенствовании существующих технологий. Авторами предлагается рассмотреть способ бурения базального льда и подледниковых горных пород, в основу которого заложен принцип возвратно-вращательного движения породоразрушающего инструмента. Первая апробация данного способа была проведена более десяти лет назад в Санкт-Петербургском горном университете и показала положительные результаты. Однако исследования были направлены на изучение процессов, протекающих в электромеханическом приводе, и не затрагивали режимов бурения горных пород. Авторами статьи планируется проведение комплекса научно-исследовательских работ, направленных на создание технологии колонкового бурения скважин в подледниковых горных породах, основанной на возвратно-вращательном движении породоразрушающего инструмента.

Ключевые слова: Антарктида и Арктика, подледниковые горные породы, колонковое бурение, возвратно-вращательное движение, породоразрушающий инструмент

Финансирование: Исследование выполнено с помощью субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2024 г. № FSRW-2024-0003.

Благодарности: Коллектив авторов выражает благодарность сотрудникам лаборатории «Технологии и техники бурения скважин в условиях станции Восток» научного центра «Арктика» Данилу Васильевичу Сербину и Дмитрию Александровичу Васильеву за помощь в подготовке статьи.

Для цитирования: Шадрин В.С., Климов В.Я., Большунов А.В. Современное состояние технологий колонкового бурения подледниковых горных пород // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 3. С. 342–355. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-342-355>. EDN: NDJVMD.

APPLIED MINING AND PETROLEUM FIELD GEOLOGY,
GEOPHYSICS, MINE SURVEYING AND SUBSOIL GEOMETRY

Review article

Current state of subglacial rock core drilling technologies

Vyacheslav S. Shadrin^{a✉}, Vladimir Ya. Klimov^b, Aleksei V. Bolshunov^c^{a-c}Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

Abstract. The purpose of the study is to make an overview of subglacial rock core drilling projects on Arctic and Antarctic islands, which have been carried out by the experts from Russia, the United States of America, Denmark and China. By analyzing the outcomes of Russian and international projects, it was possible to pinpoint the technical and geological aspects of subglacial core drilling, as well as the benefits and drawbacks of the various technologies employed. Additionally, it was possible to identify the best kind of rock-cutting tool and identify a potential direction for further advancement of currently available technologies. The authors propose to consider a method for drilling basal ice and subglacial rocks, which is based on the principle of reciprocating rotary motion of the rock-cutting tool. The first evaluation test of the method

© Шадрин В.С., Климов В.Я., Большунов А.В., 2024



under discussion was carried out more than ten years ago at Saint Petersburg Mining University and the results were encouraging. However, the researches dealt mainly with the processes occurring in the electromechanical drive rather than rock drilling modes. The authors of the article intend to carry out a series of studies with the goal of developing a core drilling method based on the reciprocating rotary motion of the rock-cutting tool for wells in subglacial rocks.

Keywords: Antarctic and Arctic, subglacial rocks, core drilling, reciprocating rotary motion, rock-cutting tool

Funding: The research was performed under the subsidy for the state assignment in the field of scientific activity for 2024 no. FSRW-2024-0003.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to Danil Vasilievich Serbin and Dmitrii Aleksandrovich Vasiliev, the staff members of the laboratory "Well drilling technologies and techniques under Vostok station conditions" of the Scientific Center "Arctic" for their assistance in the preparation of the article.

For citation: Shadrin V.S., Klimov V.Ya., Bolshunov A.V. Current state of subglacial rock core drilling technologies. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(3):342-355. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-342-355>. EDN: NDJVM D.

Введение

Керн льда подледниковых горных пород (ПГП) и донных отложений подледниковых водоемов является уникальным природным архивом геологических, микробиологических и палеоклиматических данных, изучение которого позволяет реконструировать историю развития Земли [1–3].

На сегодняшний день практические результаты в области колонкового бурения ПГП в Антарктиде и на островах Арктики получены специалистами России, США, Дании и Китая. При реализации проектов использовались две технологии:

– бурение скважин геологоразведочными установками с использованием буровых снарядов со съемным керноприемником, адаптированных для проходки скважин в леднике и ПГП;

– бурение скважин колонковыми электро-механическими буровыми снарядами на грузонесущем кабеле.

Реализованные проекты показали, что применяемые технологии бурения, помимо очевидных достоинств, имеют определенные недостатки, которые в экстремальных физико-географических условиях полярных регионов с учетом сложной логистики могут оказать существенное влияние на результаты работ [4]. Поэтому создание надежных, энергоэффективных, малометаллоемких и экологически чистых технологий колонкового бурения ПГП является актуальной научно-технической задачей.

В настоящее время в лаборатории «Технологии и техники бурения скважин в условиях станции Восток» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II ведутся работы, направленные на разработку новых и совершенствование существующих технологий и технических средств исследо-

вания ледников [5, 6] и подледниковых сред [7–9]. Одним из перспективных направлений является разработка технологий отбора керн-на базального льда, ПГП и донных отложений подледниковых озер [10–12].

В частности, разрабатывается технология колонкового бурения скважин снарядом на грузонесущем кабеле, основанная на принципе разрушения ПГП возвратно-вращательным движением (ВВД) буровой коронки [13]. Авторы статьи предполагают, что данная технология может быть лишена указанных недостатков и позволит расширить область применения колонковых электро-механических снарядов на грузонесущем кабеле. Для обоснования эффективности разрабатываемой технологии авторами статьи планируется провести экспериментальные исследования по изучению влияния режимных параметров на механическую скорость бурения горных пород ВВД буровой коронки.

Материалы и методы исследования

В 1966 г. специалисты США провели буровые работы на научно-исследовательской базе Camp Century в Гренландии, целью которых являлось исследование механизма движения ледяного покрова Гренландии. Основной задачей являлось колонковое бурение скважин вращательным способом с использованием электро-механического бурового снаряда CRREL на грузонесущем кабеле [14]. Для получения доступа к подледниковым отложениям был использован основной ствол скважины № 3 глубиной 1002 м, пробуренный в 1963 г. буровым снарядом CRREL, оснащенный термической коронкой. Для бурения льда с включениями обломков горных пород и подледниковых отложений был использован модернизированный снаряд CRREL, оснащенный коронкой с тремя



резцами, изготовленными из инструментальной стали, наружным и внутренним диаметрами 156 и 114 мм соответственно. В результате буровых работ 2 июля 1966 г. с глубины 1370,5 м был отобран керн льда с прослойками мелкого песка и гальки. С увеличением глубины скважины рейсовая проходка снижалась, что свидетельствовало об увеличении твердости включений горных пород во льду. Для дальнейшего бурения на снаряд была установлена алмазная однослойная коронка наружным и внутренним диаметрами 155,6 мм и 114,3 мм соответственно (рис. 1). Спустя два дня глубина скважины достигла отметки в 1387,4 м, являющейся границей между толщей льда и ПГП. Получив доступ к подледниковым отложениям, специалисты приняли решение пробурить в них дополнительно 4,55 м. Полученный керн мореносодержащего льда (общей длиной 16,9 м) и подледниковых отложений (4,55 м) был представлен обломками гнейса, гранита и метабазальтов [15]. Керн коренных пород (КП) не был отобран.

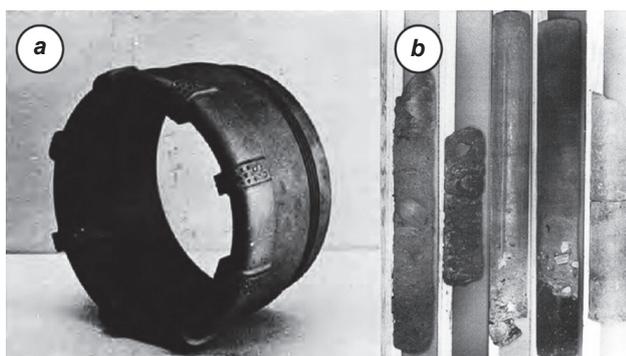


Рис. 1. Буровой проект CRREL:

a – однослойная алмазная коронка для бурения подледниковых горных пород;

b – керн моренных отложений [14]

Fig. 1. CRREL drilling project:

a – single-layer diamond drill bit for subglacial core drilling; b – basal ice core [14]

В период с 1967 по 1968 г. на станции Вурд в Западной Антарктиде буровым снарядом CRREL была пробурена скважина глубиной 2164 м. Цели и задачи проекта аналогичны целям и задачам сезона буровых работ в 1966 г. на научно-исследовательской базе Camp Century в Гренландии. При достижении глубины скважины в 2154 м наблюдалось скачкообразное изменение мощности и крутящего момента в связи с появлением твердых включений обломков горных пород на забое. В результате бурения был поднят керн длиной 2,28 м с включениями гранитной

гальки (обломков гранита) и прослоек, состоящих из мелкого песка. На глубине 2165 м на забое скважины была вскрытая водяная линза, которая не позволяла получить экологически чистый и безопасный доступ к подледниковой среде. По этой причине в 1969 г. в начале сезона буровых работ было принято решение выполнить отклонение от основного ствола скважины на глубине 2100 м и забурить дополнительный ствол, установив дополнительную секцию колонковых труб и алмазную буровую коронку наружным и внутренним диаметрами 76 и 48 мм соответственно. Доступ к подледниковой среде так и не был получен, поскольку грузонесущий кабель был оборван при спуске бурового снаряда в скважину на глубине 1545 м [16].

С 2007 по 2008 г. специалистами США были проведены буровые работы в долинах Mullins и Veason в Антарктиде [17]. С целью изучения подледниковой среды долин Mullins и Veason была выполнена модернизация переносного ручного бура. Модернизированная версия такого бура стала называться буровой установкой Kosi drill, применяемой для колонкового бурения переходной границы «Лед-ПГП». Бурение льда с включениями ПГП осуществлялось трехрезцовой коронкой по льду (рис. 2, a) и коронками, армированными дробленой твердосплавной крошкой (рис. 2, b). Для бурения ПГП с отбором керна применялись коронки, армированные термостабилизированными поликристаллическими алмазами (TSD) (рис. 2, c). В результате проведения буровых работ была пробурена скважина глубиной 10,25 м с полным отбором керна льда диаметром 80 мм с содержанием обломков ПГП. Осложнения, возникшие в ходе проведения буровых работ, были вызваны геолого-техническими особенностями бурения переходной границы «Лед-ПГП» и низкой надежностью конструкции породоразрушающего инструмента (ПРИ). Появление талой воды на забое, вызванное нагревом алмазной коронки при взаимодействии резцов с разбуриваемой ПГП, затрудняло технологический процесс и снижало механическую скорость бурения. Бурение приходилось останавливать на несколько часов до тех пор, пока температура на забое не вернется к отрицательному значению и на забое скважины вновь образуется лед.

С 2010 по 2012 г. специалистами Дании было выполнено колонковое бурение ПГП в Гренландии. Целью работ являлось получение сведений о межледниковом периоде и

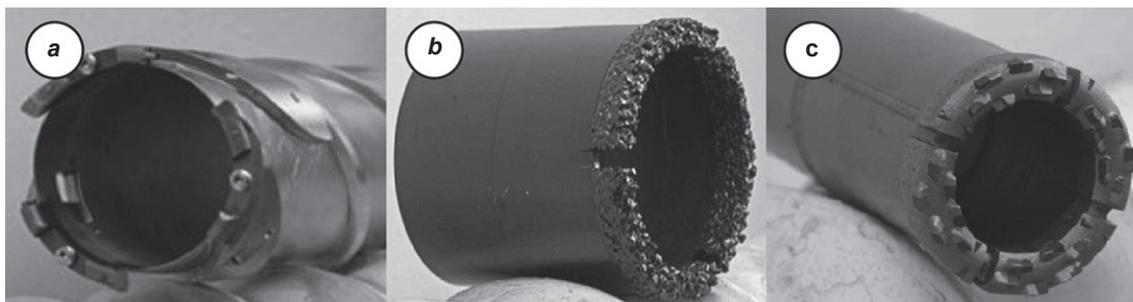


Рис. 2. Буровые коронки Koci Drill:

a – трехрезцовая стальная коронка; b – коронка, армированная дробленой твердосплавной крошкой; c – коронка TSD [17]

Fig. 2. Koci Drill bits:

a – three cutter steel bit; b – crushed carbide bit; c – TSD diamond bit [17]

последнем произошедшем оледенении материка [18]. Работы проводились с применением электромеханического бурового снаряжения NEEM на грузонесущем кабеле с модернизированной системой удаления шлама с забоя [19–21]. Буровой сезон в 2010 г. являлся этапом, продолжающим предыдущий многолетний проект по глубокому бурению льда. При глубине скважины 2537,96 м ожидалось, что через два метра будет пройдена граница между льдом и КП, однако на глубине 2537,36 м буровые работы были прекращены в связи с сильным износом стальных резцов коронки наружным и внутренним диаметром 132 мм и 98 мм соответственно (рис. 3, а).

В начале бурового сезона 2011 г. бурение продолжили, применив коронку с резцами из твердого сплава (рис. 3, б). Осевую нагрузку на забой увеличили, утяжелив буровой снаряд. Таким образом удалось пробурить дополнительно 0,74 м и отобрать керн мореносодержащего льда. Причиной столь незначительной глубины бурения явилось появление крупных обломков ПГП на забое скважины, которые привели к износу твердосплавных резцов бу-

ровой коронки, и, как следствие, ее выходу из строя. В конце бурового сезона были приняты попытки пройти отметку глубины 2538,10 м с использованием коронки TSD наружным и внутренним диаметрами 51 мм и 33 мм соответственно (рис. 3, с). Однако полученный из скважины керн длиной 0,65 м представлял собой повторно замороженную талую воду с мелкодисперсным песком.

В 2012 г. буровые работы были продолжены. Специалисты из Дании повторно применили коронку с твердосплавными резцами, но это не привело к успешному результату, поскольку при первом же контакте резцов с обломками горных пород коронка вышла из строя. Дальнейшие буровые операции были проведены с применением коронки TSD (рис. 3, с). В результате выполненных работ был получен керн слоистой структуры с включениями мелкого песка, сменяющегося на керн с включениями крупных обломков гранита и кварца. При попытке возобновления работ после 10-дневного перерыва, оказалось, что 7 м призабойной части скважины были заполнены замороженной талой водой. Времени на

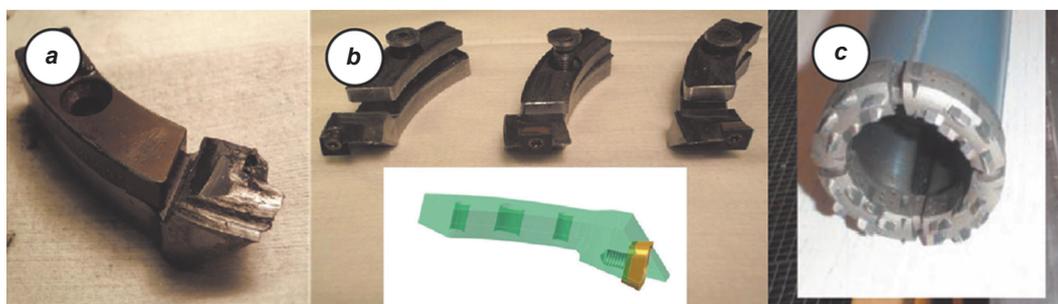


Рис. 3. Породоразрушающий инструмент, используемый при бурении горизонта 2536,34–2538,1 м:

a – резцы коронки для бурения льда; b – резцы со вставками из сплава карбида вольфрама и кобальта; c – коронка TSD [20]

Fig. 3. Rock cutting tools for drilling the depths of 2536.34–2538.1 m:

a – ice drilling bit cutters; b – cutters with tungsten carbide and cobalt alloy inserts; c – TSD diamond bit [20]



повторное разбуривание скважины не хватило. Из-за необходимости срочного завершения полевого сезона все дальнейшие работы были прекращены.

Основные осложнения, возникшие во время проведения сезонных буровых работ, были связаны с износом буровой коронки вследствие разрушения ее резцов из-за несоответствия выбранного ПРИ категории по буримости разбуриваемых горных пород. Более того, начиная с глубины бурения 2538,1 м, снижение эффективности буровых операций (или вовсе их остановка) было вызвано образованием талой воды на забое и повторным ее замерзанием.

С 2016 по 2017 гг. американскими специалистами на Пиритских Холмах в Антарктиде были проведены работы по колонковому вращательному бурению с использованием колонны бурильных труб в ПГП в рамках реализации программы Ice Drilling Program Office [22]. Задачей данного проекта являлось бурение двух скважин глубиной 100 и 200 м с извлечением из каждой скважины керна льда длиной 10 м и керна ПГП длиной 5 м. Бурение ПГП осуществлялось буровой установкой Agile Sub-Ice Geological, изготовлением которой занималась компания Multi Power Products из Келоуны, Канада. Бурение мореносодержащего льда и ПГП осуществлялось коронкой, армированной алмазно-твердосплавными пластинами (PDC-вставками) (рис. 4, а), коронкой TSD и алмазной импрегнированной буровой коронкой, наружный и внутренний диаметр которых составлял 62,5 мм и 39 мм соответственно (рис. 4, б). Первые 5 м керны гранитоидов были получены при использовании алмазной коронки с PDC-вставками с глубины 149,8 м. Следующие 3 м керны были отобраны с глубины 154,8 м с помощью алмазной импрегнированной коронки, так как коронка с PDC-вставками была изношена в процессе бурения на предыдущем рейсе (рис. 4, с). В ходе проведения буровых работ специалисты столкнулись с поглощением заливочной жидкости в трещины горных пород на забое скважины.

С 2018 по 2019 гг. китайские исследователи провели буровые работы в 12 км южнее станции Чжуншань в Антарктиде [23] для изучения переходной границы «Лед – ПГП» и проведения минералогического, кристаллографического и петрографического анализа образцов. Бурение ледяного покрова и

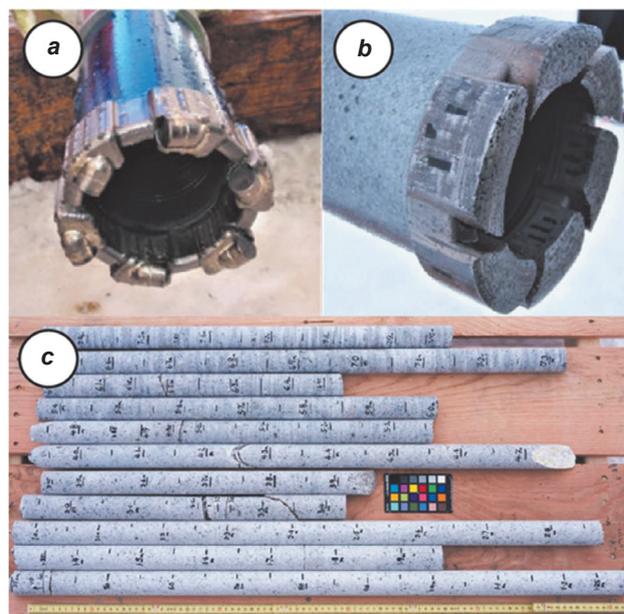


Рис. 4. Буровой проект ASIG:

- а – коронка с PDC-вставками;
 - б – алмазная импрегнированная коронка;
 - с – керны гранитоидов из скважины на буровой площадке № 2 [22]
- Fig. 4. ASIG drilling project:**
- a – drill bit with PDC inserts;
 - b – diamond impregnated drill bit;
 - c – granitoid cores from the drilling site no. 2 [22]

ПГП осуществлялось электромеханическим буровым снарядом IBED на грузонесущем кабеле [24, 25]. Во время проведения буровых работ в интервале глубин с 190,75 до 197,83 м наблюдалось постепенное увеличение размеров включений ПГП в ледяном керне. На глубине 197,83 м бурение было остановлено для замены резцовой коронки, предназначенной для бурения по льду из-за ее сильного износа. Бурение мореносодержащего льда и КП осуществлялось с коронкой с PDC-вставками и алмазной импрегнированной коронкой (рис. 5, б, с). Коронкой с PDC-вставками удалось пробурить лишь 0,22 м и отобрать керн мореносодержащего льда. Для продолжения бурения была использована импрегнированная коронка, что потребовало увеличения осевой нагрузки на забой скважины, поэтому было принято решение увеличить массу бурового снаряда на 100 кг. Результатом успешного применения импрегнированной коронки стал керн КП длиной 6 см, несмотря на то, что проходка за рейс была более 0,5 м. Причина подобного исхода ясна – при отрыве керн не был оторван от забоя целиком, а его часть осталась на забое скважины.

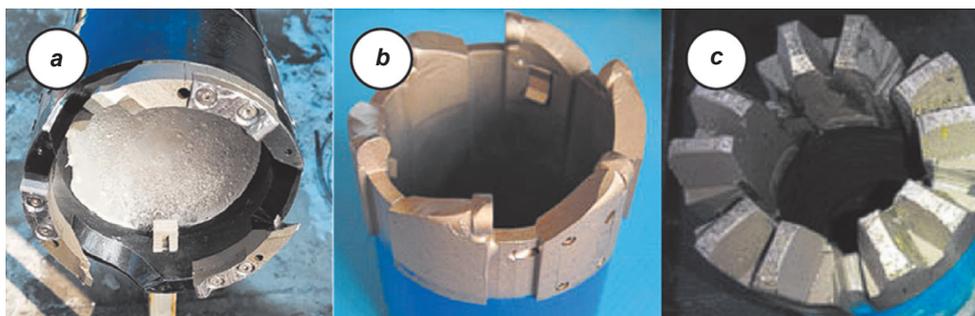


Рис. 5. Буровые коронки IBED:

a – коронка со стальными резцами для бурения льда; b – коронка с PDC-вставками; c – алмазная импрегнированная коронка [24]

Fig. 5. IBED drill bits:

a – steel cutter bit for ice drilling; b – bit with PDC inserts; c – diamond impregnated drill bit [24]

С 2019 по 2020 гг. американскими специалистами в 90 км южнее станции Мак-Мердо на мысе Минна-Блафф проводилось колонковое бурение ПГП [26]. Целью буровых работ, проводимых в рамках программы US Antarctic Program (USAP), являлось изучение ледяного покрова Антарктиды и геологии подледниковой среды. Бурение ПГП осуществлялось гидрофицированной установкой RAID с подвижным вращателем. Для бурения льда с включениями обломков ПГП применяли коронку с твердосплавными резцами и коронку с PDC-вставками наружным и внутренним диаметром 56 мм и 38 мм соответственно (рис. 6, а). Бурение КП выполнялось алмазной импрегнированной коронкой (рис. 6, а). По завершении сезона буровых работ с глубины 678 м был поднят керн тиллитов (рис. 6, b). Как таковых осложнений в ходе буровых работ не отмечалось. По итогам бурения специалистами было высказано предложение о необходимости модернизации системы удаления шлама с забоя скважины при проведении работ в следующих сезонах.

С 2016 по 2020 гг. специалисты отдела Subglacial Access Working (США) проводили буровые работы в Антарктиде на хребте Огайо (2016–2017 г.), в долине Онг (2017–2018 г.) и на горе Мерфи (проект Mount Murphy 2019–2020 г.) в рамках реализации буровой программы Ice Drilling Program (IDP) [27]. Целью работ являлось изучение процесса освобождения суши и морских акваторий от покрова налегающих и плавучих ледников (ледник Туэйтс). Бурение осуществлялось модифицированной версией буровой установки Winkie Drill с подвижным вращателем, предназначенной для колонкового бурения геологоразведочных скважин. Колонковое вращатель-

ное бурение ПГП осуществлялось коронками нескольких видов: с PDC-вставками, армированной TSD-резцами и алмазной импрегнированной коронкой. Самым эффективным ПРИ при бурении переходной границы «Лед-ПГП» оказалась коронка TSD. Осложнения при бурении были связаны с избыточным тепловыделением на забое при работе ПРИ, что приводило к растеплению стенок скважины и затрудняло технологический процесс.



Рис. 6. Буровой проект RAID:

a – коронка с твердосплавными резцами, с PDC-вставками, алмазная импрегнированная коронка (слева направо); b – керн подледниковой горной породы, представленной включениями тиллитов, магматической горной породы и черного базальта [26]

Fig. 6. RAID drilling project:

a – bit with carbide inserts, with PDC inserts, diamond impregnated drill bit (from left to right); b – core of subglacial rock represented by the inclusions of tillites, igneous rock and black basalt [26]



На хребте Огайо в результате сезона буровых работ было пробурено восемь скважин глубиной от 12,1 до 54,9 м и отобрано 2,5 м керна горных пород кристаллического фундамента. В долине Онг было пробурено две скважины глубиной 9,45 и 12,36 м и отобраны керн мореносодержащего льда длиной 21,81 м диаметром 71,7 мм. У подножья горы Маунт Мерфи было пробурено шесть скважин, в четырех из которых получен керн льда (общей длиной 3,87 м и диаметром 33,5 мм) с включениями обломков гранита.

К изучению подледниковой среды проявили интерес специалисты из Великобритании. В целях получения данных для космогонического датирования и изучения динамики (отступление и расширение) ледников, ими планируется провести колонковое бурение ПГП на куполе С (Little Dome С). Технология бурения и сроки проведения запланированных буровых работ не указаны [28].

В 1988 г. специалистами Ленинградского горного института (ныне Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II) в леднике Вавилова (остров Октябрьской революции, архипелаг Северная Земля) была пробурена скважина глубиной 461,61 м. Целью буровых работ являлся отбор керна из зоны контакта ледника и его ложа для определения содержания крупнообломочного материала. Бу-

рение было выполнено с помощью колонкового электромеханического снаряда КЭМС-112 на грузонесущем кабеле, оснащенного коронкой со стальными резцами наружным и внутренним диаметрами 112 мм и 86 мм соответственно. В результате бурения удалось отобрать керн длиной 4,43 м, содержащий моренные отложения. В 1999 г. на леднике Академии наук (остров Комсомолец, архипелаг Северная Земля) было выполнено колонковое бурение электромеханическим буровым снарядом КЭМС-127 на грузонесущем кабеле, оснащенным трехрезцовой стальной коронкой наружным диаметром 135 мм. Одной из главных задач экспедиции являлось колонковое бурение скважины глубиной 700 м на леднике Академии наук с последующим выходом в подледниковые отложения и отбор проб погребенного льда для палеографических исследований [29]. Колонковое бурение по подледниковым отложениям велось твердосплавной коронкой СМ-5 наружным диаметром 112 мм, а для отбора керна использовалась твердосплавная коронка СМ-3 наружным диаметром 112 мм. В 2001 г. на глубине скважины 720 м были вскрыты подледниковые отложения, по которым было пробурено 4 м с полным отбором керна. Бурение было закончено 16 мая на глубине 724 м.

В таблице представлены результаты обзора отечественных и зарубежных проектов по бурению ПГП.

Отечественные и зарубежные проекты колонкового бурения подледниковых горных пород Domestic and foreign subglacial core drilling projects

| Год | Проект (страна) | Место бурения | Техническое средство | Тип породоразрушающего инструмента (наружный / внутренний диаметр, мм) | Керновый материал (длина керна, горная порода) |
|-----------|--|---|--|--|---|
| 1966 | CRELL program (часть гляциологической программы U.S. IGY) (США) | Научно-исследовательская база Camp Century, Северо-Запад Гренландии | Колонковый электромеханический снаряд на грузонесущем кабеле CRREL | Трехрезцовая коронка для бурения льда (156/114) | Керн мореносодержащего льда 16,9 м и подледниковых отложений 4,55 м представлен обломками гнейса, гранита и метабазальтов |
| 1967–1968 | | Станция Вурд, Западная Антарктида | | Алмазная однослойная коронка (155,6/114,3) | |
| 1998 | Экспериментальное бурение подстилающих пород на архипелаге Северная Земля (Россия) | Остров Октябрьской революции (ледник Вавилова) | Колонковые электромеханические снаряды на грузонесущем кабеле КЭМС | Трехрезцовая коронка для бурения льда (135/106) | Керн мореносодержащего льда 4,43 м |
| 1999–2001 | | Остров Комсомолец (ледник Академии наук) | | Коронки СМ-5 и СМ-3 (112/94) | Керн мореносодержащего льда 4 м |



| | | | | | |
|-----------|--|---|--|---|---------------------------------------|
| 2007–2008 | Бурение в долинах Маллинс и Бикон (США) | Окрестности Мак-Мердо, долин Маллинс и Бикон (Антарктида) | Буровая установка Kosi Drill (модернизированная версия бура Kosi) | Трехрезцовая коронка для бурения льда (102/80) | Керн мореносодержащего льда 10,25 м |
| | | | | Crushed carbide (не указано) | |
| | | | | TSD (не указано) | |
| 2010–2012 | North Greenland Eemian Ice Drilling (NEEM) (Дания) | Северо-Запад Гренландии | Колонковый электромеханический снаряд на грузонесущем кабеле NEEM Drill | 1. Трехрезцовая коронка для бурения льда (не указано); 2. Трехрезцовая со вставками карбид вольфрама и кобальта (не указано); 3. TSD (не указано) | Керн мореносодержащего льда 1,76 м |
| 2016–2017 | Ice Drilling Program (IDP) (США) | Пиритские холмы (г. Элсуорт-Уитмор) | Буровая установка ASIG Drill для геологоразведочного бурения | 1. с PDC-вставками (не указано); 2. Импрегнированная алмазная (не указано); 3. Ступенчатая однослойная алмазная с матрицей треугольной формы (не указано) | Керн 8 м, представленный гранитоидами |
| 2018–2019 | Бурение в подледниковых горах Гамбурцева (Китай) | Подледниковые горы Гамбурцева (12 км южнее станции Чжуньшань) | Колонковый электромеханический снаряд на грузонесущем кабеле IBED | 1. Трехрезцовая коронка для бурения льда (136/105); 2. С PDC-вставками (136/104); 3. Алмазная импрегнированная (60/41); | Керн 0,6 м КП |
| 2019–2020 | US Antarctic Program (USAP) (США) | Южная сторона мыса Минна-Блафф (2019/2020 гг.) | Буровая установка RAID для геологоразведочного бурения | 1. С твердосплавными резцами (89/56); 2. Коронка с PDC-вставками (56/38); 3. Импрегнированная алмазная коронка (56/38); | Керн 2,2 м КП |
| 2016–2020 | Ice Drilling Program (IDP) (США) | Хребет Огайо (сезон 2016/2017 гг.) | Буровая геологоразведочная установка Winkie Drill с подвижным вращателем | 1. Трехрезцовая коронка для бурения льда (–/33,5); 2. Коронка с PDC-вставками (–/71,7); 3. Коронка TSD; (–/33,5) 4. Импрегнированная алмазная коронка (–/33,5) | Керн 2,5 м КП |
| | | Долина Онг (сезон 2017/2018 гг.) | | | Керн мореносодержащего льда 21,81 м |
| | | Гора Мерфи (сезон 2019/2020 гг.) | | | Керн мореносодержащего льда 3,87 м |

Результаты исследования и их обсуждение

В рассмотренных отечественных и зарубежных проектах колонкового бурения ПГП применялись две технологии:

– бурение скважин геологоразведочными установками с использованием буровых снарядов со съемным керноприемником, адаптированных для проходки скважин в леднике и ПГП;



– бурение скважин колонковыми электро-механическими буровыми снарядами на грузонесущем кабеле.

Бурение выполнялось коронками:

- со стальными резцами;
- резцами из твердого сплава;
- армированными дробленой твердосплавной крошкой;
- с PDC-вставками;
- с режущими элементами TSD;
- однослойными и импрегнированными алмазными коронками.

Диаметры полученного керна изменялись в диапазоне от 33,5 до 114 мм в зависимости от параметров бурового снаряда и типоразмера ПРИ. Наибольшую эффективность при бурении ПГП показали коронки TSD, алмазные однослойные и импрегнированные коронки.

За последние годы число проектов, задачей которых являлся отбор кернового материала КП, залегающих под ледовым куполом, значительно выросло (см. таблицу).

Применение хорошо зарекомендовавших себя технологий бурения геологоразведочными установками с использованием буровых снарядов со съёмным керноприёмником достаточно эффективно, но вызывает определенные сложности из-за значительных массогабаритных характеристик оборудования, затрудняющих его эксплуатацию в условиях континентальной Антарктиды.

Технология бурения скважин колонковыми электро-механическими буровыми снарядами на грузонесущем кабеле нашла широкое применение в условиях Арктики и Антарктики при глубоком бурении ледников, слоя базального льда и КП, в том числе и при реализации отечественных проектов [30, 31]. Однако ее применение при бурении границы контакта ледника с ПГП вызывало ряд осложнений, которые были обусловлены тремя основными факторами:

– недостаточной нагрузкой на ПРИ при бурении твердых горных пород снарядом на грузонесущем кабеле;

– несоответствием используемого вида ПРИ характеру проходимых горных пород;

– неэффективной очисткой призабойной зоны скважины от ледового шлама и талой воды;

Попытки устранить осложнения сводились к:

- увеличению веса бурового снаряда;

– использованию ПРИ, соответствующего свойствам проходимых горных пород;

– изменению направления циркуляции промывочной жидкости и регулированию ее расхода;

– изменению конструкции шламоборных фильтров.

Несмотря на принятые меры, механическая скорость бурения и длина рейса при использовании электро-механических снарядов на грузонесущем кабеле с применением алмазных и армированных PDC-резцами коронок с увеличенной осевой нагрузкой повысилась незначительно. Возникает вопрос – существует ли иной способ бурения горных пород, который позволит выполнить колонковое бурение скважины электро-механическими снарядами на грузонесущем кабеле с осевой нагрузкой на ПРИ, создаваемой только весом бурового снаряда?

Известен возвратно-вращательный способ разрушения горных пород, заключающийся в воздействии знакопеременных нагрузок, создаваемых возвратно-поворотными колебаниями ПРИ, на горную породу. Комплекс научно-исследовательских работ, проведенный научным коллективом под руководством профессора Э.А. Загрянного, был направлен на исследование динамических процессов электро-механической системы колонкового набора и был выполнен только на экспериментальном стенде, состоящем из колонковой трубы с алмазной коронкой, торсионного вала, электродвигателя с системой управления и ручной системы подачи колонкового набора на забой. В результате выполненных исследований было пробурено несколько скважин глубиной 10 см в полнотелом кирпиче марки М-150 и получено несколько кернов хорошего качества, что позволило авторам сделать вывод о пригодности возвратно-вращательного способа разрушения горных пород [11, 13]. Однако разработанный способ не был апробирован в условиях, приближенных к скважинным, поскольку не имел конструктивных узлов присущих буровым снарядам на грузонесущем кабеле: кабельного замка; электроотсека; направляющего устройства (центратора); насоса; механической секции с системой упругих элементов, шламоборных фильтров.

Динамически уравновешенный буровой снаряд, реализующий ВВД ПРИ, планирова-



лось применить для отбора проб донных рыхлых отложений подледникового озера Восток. Однако на сегодняшний день буровой снаряд, использующий принцип ВВД ПРИ, не разработан, а технология бурения льда и горных пород не изучена.

Авторами статьи предполагается, что технология колонкового бурения скважин в донных отложениях динамическим уравновешенным буровым снарядом на грузонесущем кабеле применима при бурении ПГП и может иметь ряд преимуществ перед технологиями, рассмотренными выше. К таким преимуществам можно отнести:

- возможность бурения скважин в твердых горных породах под нагрузкой, значение которой меньше/равно весу бурового снаряда, подвешенного в скважине на грузонесущем кабеле;

- возможность бурения слоя базального льда, слагаемого обломками ПГП различной твердости, стенки которого могут быть недостаточного прочны;

- снижение воздействия реактивного момента на стенки скважины.

Для подтверждения вышесказанных предположений авторами статьи планируется проведение экспериментальных исследований, результаты которых позволят получить:

- зависимости механической скорости бурения горных пород возвратно-вращательным способом от режимных параметров;

- рекомендации по выбору режимных параметров бурения в зависимости от геометрических параметров ПРИ и физико-механических свойств горных пород;

- обоснование теоретической модели разрушения горных пород ВВД ПРИ.

Заключение

Обзор отечественных и зарубежных проектов колонкового бурения ПГП позволил определить (выявить) актуальное направление исследований в области техники и технологии колонкового бурения скважин с отбором керна на антарктическом континенте.

Хорошо зарекомендовавшие себя технологии колонкового бурения скважин в ПГП в рассмотренных выше проектах имеют ряд недостатков, не позволяющих применить их для бурения скважин в ПГП. В связи с этим возникает необходимость в разработке технологии колонкового бурения ПГП, которая будет обладать низкими массогабаритными характеристиками и возможностью бурить твердые горные породы при малых значениях осевой нагрузки на буровую коронку с минимальным реактивным моментом на корпус бурового снаряда в условиях низкой прочности горных пород, слагающих стенки скважины.

Предполагается, что указанных недостатков лишена технология колонкового бурения ПГП, основанная на разрушении горных пород ВВД ПРИ. Для подтверждения эффективности разрабатываемой технологии и технических средств ее реализации необходимо провести научно-исследовательские работы на экспериментальном стенде, который создается в настоящее время в лаборатории «Технологии и техники бурения скважин в условиях станции Восток» научного центра «Арктика» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

Список источников

1. Михальский Е.В., Каменев Е.Н., Михальская А.С. Геологическое изучение Антарктиды: исторические аспекты и современное состояние // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 2. С. 97–112. EDN: NYHDPH.
2. Wu G., Ferraccioli F., Zhou W., Yuan Y., Gao J., Tian G. Tectonic implications for the Gamburtsev Subglacial Mountains, East Antarctica, from airborne gravity and magnetic data // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Iss. 2. P. 306. <https://doi.org/10.3390/rs15020306>.
3. Litvinenko V.S., Leitchenkov G.L., Vasiliev N.I. Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling // Geochemistry. 2020. Vol. 80. Iss. 3. P. 125556. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.125556>.
4. Васильев Н.И., Дмитриев А.Н., Липенков В.Я. Результаты бурения скважины 5Г на российской станции «Восток» и исследования кернов льда // Записки Горного института. 2016. Т. 218. С. 161–171. EDN: VXLDMJ.
5. Большунов А.В., Васильев Д.А., Дмитриев А.Н., Игнатьев С.А., Кадочников В.Г., Крикун Н.С. [и др.]. Результаты комплексных экспериментальных исследований на станции Восток в Антарктиде // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 724–741. EDN: WQNJET.
6. Игнатьев С.А., Васильев Д.А., Большунов А.В., Васильева М.А., Ожигин А.Ю. Экспериментальные исследования переноса ледяного шлама воздухом при бурении снежно-фирновой толщи // Лед и Снег. 2023. Т. 63. № 1. С. 141–152. <https://doi.org/10.31857/S2076673423010076>. EDN: MABFEO.



7. Большунов А.В., Васильев Д.А., Игнатьев С.А., Дмитриев А.Н., Васильев Н.И. Механическое бурение ледников с очисткой забоя сжатым воздухом // *Лед и Снег*. 2022. Т. 62. № 1. С. 35–46. <https://doi.org/10.31857/S2076673422010114>. EDN: GOFZCL.
8. Сербин Д.В., Дмитриев А.Н. Экспериментальные исследования теплового способа бурения плавлением скважины в ледовом массиве с одновременным контролируемым расширением ее диаметра // *Записки Горного института*. 2022. Т. 257. С. 833–842. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.82>. EDN: PLQDJW.
9. Сербин Д.В., Кадочников В.Г., Большунов А.В., Дмитриев А.Н., Горелик В.Г. Экспериментальные исследования процесса образования призабойной кольцевой циркуляции теплоносителя // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2024. № 1. С. 16–22. EDN: XZVQNT.
10. Лейченко Г.Л., Попков А.М. Прогнозный осадочный разрез подледникового озера Восток // *Лед и снег*. 2012. Т. 52. № 4. С. 21–30. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-4-21-30>. EDN: PKEFDH.
11. Васильев Н.И., Лейченко Г.Л., Загривный Э.А. Перспективы получения образцов донных отложений подледникового озера Восток // *Записки Горного института*. 2017. Т. 224. С. 199–208. <https://doi.org/10.18454/PMI.2017.2.199>. EDN: YLMZAH.
12. Шишкин Е.В., Большунов А.В., Тимофеев И.П., Авдеев А.М., Ракитин И.В. Модель шагающего пробоотборника для исследования донной поверхности подледникового озера Восток // *Записки Горного института*. 2022. Т. 257. С. 853–864. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.53>. EDN: UMV LXQ.
13. Загривный Э.А., Поддубный Д.А. Динамически уравновешенный буровой снаряд на грузонесущем кабеле для взятия донных отложений подледниковых озёр в Антарктиде // *Проблема механики современных машин: материалы VII Междунар. науч. конф. (г. Улан-Удэ, 25–30 июня 2018 г.)*. Улан-Удэ, 2018. Т. 1. С. 197–201. EDN: YQRMJN.
14. Hansen L.B. Deep core drilling in ice and core analysis at Camp Century, Greenland, 1961–1966 // *Antarctic Journal of the United States*. 1966. Vol. 1. Iss. 5. P. 207–208.
15. Fountain J., Ussekman T.M., Wooden J., Langway C.C.J. Evidence of the bedrock beneath the Greenland ice sheet near camp century Greenland // *Journal of Glaciology*. 1981. Vol. 27. Iss. 95. P. 193–197.
16. Ueda H.T. Byrd station drilling 1966–69 // *Annals of Glaciology*. 2007. Vol. 47. P. 24–27. <https://doi.org/10.3189/172756407786857631>.
17. Green J., Koci B., Kyne J. Koci drill for drilling ice, sand and rock: drill requirements, design, performance and difficulties // *Annals of Glaciology*. 2007. Vol. 47. P. 105–108. <https://doi.org/10.3189/172756407786857677>.
18. Christa A.J., Biermana P.R., Schaeferd J.M., Dahl-Jensene D., Steffensene J.P., Corbetta L.B., et al. A multimillion-year-old-record of Greenland vegetation and glacial history preserved in sediment beneath 1.4 km of ice at Camp Century // *PNAS*. 2021. Vol. 118. Iss. 13. № 2021442118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2021442118>.
19. Rasmussen S.O., Abbott P.M., Blunier T., Bourne A.J., Brook E., Buchardt S., et al. A first chronology for the North Greenland Eemian Ice Drilling (NEEM) ice core // *Climate of the Past*. 2013. Vol. 9. Iss. 6. P. 2713–2730. <https://doi.org/10.5194/cp-9-2713-2013>.
20. Popp T.J., Hansen St.B., Sheldon S.G., Schwander J., Johnson J.A. Drilling into debris-rich ice at the bottom of the NEEM (Greenland) borehole // *Annals of Glaciology*. 2014. Vol. 55. Iss. 68. P. 199–206. <https://doi.org/10.3189/2014AoG68A029>.
21. Popp T.J., Hansen St.B., Sheldon S.G., Schwander J., Johnson J.A. Deep ice-core drilling performance and experience at NEEM, Greenland // *Annals of Glaciology*. 2014. Vol. 55. Iss. 68. P. 53–64. <https://doi.org/10.3189/2014AoG68A042>.
22. Kuhl T., Gibson C., Johnson J., Boeckmann G., Moravec E., Slaqny K. Agile Sub-Ice Geological (ASIG) Drill development and Pirrit Hills field project // *Annals of Glaciology*. 2020. Vol. 62. Iss. 84. P. 53–56. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.59>.
23. Talalay P., Sun Y., Fan X., Zhang N., Cao P., Wang R., et al. Antarctic subglacial drilling rig. Part I: General concept and drilling shelter structure // *Annals of Glaciology*. 2020. Vol. 62. Iss. 84. P. 1–11. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.37>.
24. Talalay P., Li X., Zhang N., Fan X., Sun Y., Cao P., et al. Antarctic subglacial drilling rig. Part II: Ice and Bedrock Electromechanical Drill (IBED) // *Annals of Glaciology*. 2021. Vol. 62. Iss. 84. P. 12–22. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.38>.
25. Fan X., Talalay P., Sun Yo., Li X., Zhang N., Markov A., et al. Antarctic subglacial drilling rig: Part III. Drilling auxiliaries and environment measures // *Annals of Glaciology*. 2020. Vol. 62. Iss. 84. P. 24–33. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.39>.
26. Goodge J.W., Severinghaus J.P., Johnson J., Tosi D., Bay R. Deep ice drilling, bedrock coring and dust logging with the Rapid Access Ice Drill (RAID) at Minna Bluff, Antarctica // *Annals of Glaciology*. 2021. Vol. 62. Iss. 85–86. P. 324–339. <https://doi.org/10.1017/aog.2021.13>.
27. Boeckmann G.V., Gibson C.J., Kuhl T.W., Moravec E., Johnson J.A., Meulemans Z., et al. Adaptation of the Winkie Drill for Subglacial bedrock sampling // *Annals of Glaciology*. 2020. Vol. 62. Iss. 84. P. 109–117. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.73>.
28. Rix J., Mulvaney R., Hong J., Ashurst D. Development of the British Antarctic Survey Rapid Access Isotope Drill // *Journal of Glaciology*. 2019. Vol. 65. Iss. 250. P. 288–298. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.9>.
29. Большианов Д.Ю., Клементьев О.Л., Коротков И.М., Николаев В.И. Исследования керна мореносодержащего льда ледника Вавилова на Северной Земле // *Материалы гляциологических исследований*. 1990. № 70. С. 105–110.
30. Litvinenko V.S. Foreword: sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Antarctic natural resource development // *Geochemistry*. 2020. Vol. 80. Iss. 3. P. 125652. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125652>.
31. Литвиненко В.С. Уникальные техника и технология бурения скважин во льдах Антарктиды // *Записки Горного института*. 2014. Т. 210. С. 5–10. EDN: TGNKO.



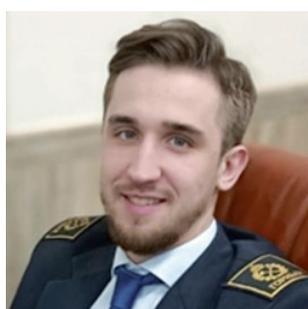
References

1. Mihalskii E.V., Kamenev E.N., Mihalskaya A.S. Geological study of Antarctica: historical aspects and current state. *Arctic and Antarctic Research*. 2011;2:97-112. (In Russ.). EDN: NYHDPH.
2. Wu G., Ferraccioli F., Zhou W., Yuan Y., Gao J., Tian G. Tectonic implications for the Gamburtsev Subglacial Mountains, East Antarctica, from airborne gravity and magnetic data. *Remote Sensing*. 2023;15(2):306. <https://doi.org/10.3390/rs15020306>.
3. Litvinenko V.S., Leitchenkov G.L., Vasiliev N.I. Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling. *Geochemistry*. 2020;80(3):125556. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.125556>.
4. Vasilev N.I., Dmitriev A.N., Lipenkov V.Y. Results of the 5G borehole drilling at Russian Antarctic station "Vostok" and researches of ice cores. *Journal of Mining Institute*. 2016;218:161-171. (In Russ.). EDN: VXLDMJ.
5. Bolshunov A.V., Vasilev D.A., Dmitriev A.N., Ignatev S.A., Kadochnikov V.G., Krikun N.S., et al. Results of complex experimental studies at Vostok station in Antarctica. *Journal of Mining Institute*. 2023;263:724-741. (In Russ.). EDN: WQNJET.
6. Ignatiev S.A., Vasilev D.A., Bolshunov A.V., Vasileva M.A., Ozhigin A.Yu. Experimental research of ice cuttings transport by air while drilling of the snow-firm layer. *Ice and Snow*. 2023;63(1):141-152. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2076673423010076>. EDN: MABFEO.
7. Bolshunov A.V., Vasilev D.A., Ignatiev S.A., Dmitriev A.N., Vasilev N.I. Mechanical drilling of glaciers with bottom-hole scavenging with compressed air. *Ice and Snow*. 2022;62(1):35-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2076673422010114>. EDN: GOFZCL.
8. Serbin D.V., Dmitriev A.N. Experimental research on the thermal method of drilling by melting the well in ice mass with simultaneous controlled expansion of its diameter. *Journal of Mining Institute*. 2022;257:833-842. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.82>. EDN: PLQDJW.
9. Serbin D.V., Bolshunov A.V., Dmitriev A.N., Kadochnikov V.G., Gorelikov V.G. Experimental studies of the process of bottomhole annular coolant circulation formation. *Onshore and Offshore Oil and Gas Well Construction*. 2024;1:16-22. (In Russ.). EDN: XZVQNT.
10. Leychenkov G.I., Popkov A.M. Predictive sedimentary section of subglacial Lake Vostok. *Ice and Snow*. 2012;52(4):21-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-4-21-30>. EDN: PKEFDH.
11. Vasiliev N.I., Leichenkov G.L., Zagrivnyi E.A. Prospects of obtaining samples of bottom sediments from subglacial Lake Vostok. *Journal of Mining Institute*. 2017;224:199-208. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/PMI.2017.2.199>. EDN: YLMZAH.
12. Shishkin E.V., Bolshunov A.V., Timofeev I.P., Avdeev A.M., Rakitin I.V. Model of a walking sampler for research of the bottom surface in the subglacial Lake Vostok. *Journal of Mining Institute*. 2022;257:853-864. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.53>. EDN: UMLXQ.
13. Zagrivny E.A., Poddubny D.A. Dynamically balanced drilling machine for a load-carrying cable for taking bottom sediments of subglacial lakes in Antarctica. In: *Problema mekhaniki sovremennykh mashin: materialy VII Mezhdunar. nauch. konf. = The problem of modern machinery mechanics: Proceedings of the 7th International scientific conference*. 25–30 June 2018, Ulan-Ude. Ulan-Ude; 2018, vol. 1, p. 197-201. (In Russ.). EDN: YQRMJN.
14. Hansen L.B. Deep core drilling in ice and core analysis at Camp Century, Greenland, 1961–1966. *Antarctic Journal of the United States*. 1966;1(5):207-208.
15. Fountain J., Ussekman T.M., Wooden J., Langway C.C.J. Evidence of the bedrock beneath the Greenland ice sheet near camp century Greenland. *Journal of Glaciology*. 1981;27(95):193-197.
16. Ueda H.T. Byrd station drilling 1966–69. *Annals of Glaciology*. 2007;47:24-27. <https://doi.org/10.3189/172756407786857631>.
17. Green J., Koci B., Kyne J. Koci drill for drilling ice, sand and rock: drill requirements, design, performance and difficulties. *Annals of Glaciology*. 2007;47:105-108. <https://doi.org/10.3189/172756407786857677>.
18. Christa A.J., Biermana P.R., Schaeferd J.M., Dahl-Jensene D., Steffensene J.P., Corbetta L.B., et al. A multimillion-year-old-record of Greenland vegetation and glacial history preserved in sediment beneath 1.4 km of ice at Camp Century. *PNAS*. 2021;118(13):2021442118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2021442118>.
19. Rasmussen S.O., Abbott P.M., Blunier T., Bourne A.J., Brook E., Buchardt S., et al. A first chronology for the North Greenland Eemian Ice Drilling (NEEM) ice core. *Climate of the Past*. 2013;9(6):2713-2730. <https://doi.org/10.5194/cp-9-2713-2013>.
20. Popp T.J., Hansen St.B., Sheldon S.G., Schwander J., Johnson J.A. Drilling into debris-rich ice at the bottom of the NEEM (Greenland) borehole. *Annals of Glaciology*. 2014;55(68):199-206. <https://doi.org/10.3189/2014AoG68A029>.
21. Popp T.J., Hansen St.B., Sheldon S.G., Schwander J., Johnson J.A. Deep ice-core drilling performance and experience at NEEM, Greenland. *Annals of Glaciology*. 2014;55(68):53-64. <https://doi.org/10.3189/2014AoG68A042>.
22. Kuhl T., Gibson C., Johnson J., Boeckmann G., Moravec E., Slaqny K. Agile Sub-Ice Geological (ASIG) Drill development and Pirrit Hills field project. *Annals of Glaciology*. 2020;62(84):53-56. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.59>.
23. Talalay P., Sun Y., Fan X., Zhang N., Cao P., Wang R., et al. Antarctic subglacial drilling rig. Part I: General concept and drilling shelter structure. *Annals of Glaciology*. 2020;62(84):1-11. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.37>.
24. Talalay P., Li X., Zhang N., Fan X., Sun Y., Cao P., et al. Antarctic subglacial drilling rig. Part II: Ice and Bedrock Electromechanical Drill (IBED). *Annals of Glaciology*. 2021;62(84):12-22. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.38>.



25. Fan X., Talalay P., Sun Yo., Li X., Zhang N., Markov A., et al. Antarctic subglacial drilling rig: Part III. Drilling auxiliaries and environment measures. *Annals of Glaciology*. 2020;62(84):24-33. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.39>.
26. Goodge J.W., Severinghaus J.P., Johnson J., Tosi D., Bay R. Deep ice drilling, bedrock coring and dust logging with the Rapid Access Ice Drill (RAID) at Minna Bluff, Antarctica. *Annals of Glaciology*. 2021;62(85-86):324-339. <https://doi.org/10.1017/aog.2021.13>.
27. Boeckmann G.V., Gibson C.J., Kuhl T.W., Moravec E., Johnson J.A., Meulemans Z., et al. Adaptation of the Winkie Drill for Subglacial bedrock sampling. *Annals of Glaciology*. 2020;62(84):109-117. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.73>.
28. Rix J., Mulvaney R., Hong J., Ashurst D. Development of the British Antarctic Survey Rapid Access Isotope Drill. *Journal of Glaciology*. 2019;65(250):288-298. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.9>.
29. Bolshiyonov D.Yu., Klementiev O.L., Korotkov I.M., Nikolaev V.I. Studying the core of the Vavilov glacier moraine-containing ice on the Northern Earth. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. 1990;70:105-110. (In Russ).
30. Litvinenko V.S. Foreword: sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Antarctic natural resource development. *Geochemistry*. 2020;80(3):125652. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125652>.
31. Litvinenko V.S. Unique technique and technology of drilling wells in Antarctic ice. *Journal of Mining Institute*. 2014;210:5-10. (In Russ.). EDN: TGNKO.

Информация об авторах / Information about the authors



Шадрин Вячеслав Сергеевич,

аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, Россия,
✉ Shadrin_VS@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0002-2329-3435>

Vyacheslav S. Shadrin,

Postgraduate Student,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia,
✉ Shadrin_VS@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0002-2329-3435>



Климов Владимир Яковлевич,

кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник Лаборатории
технологии и техники бурения
скважин в условиях станции Восток,
Научный центр «Арктика»,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, Россия,
Klimov_VYa@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0000-9023-9397>

Vladimir Ya. Klimov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Senior Researcher of the Laboratory of Technology
and Drilling Equipment in Vostok Station Conditions,
Arktika Research Center,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia,
Klimov_VYa@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0000-9023-9397>



Большунов Алексей Викторович,

кандидат технических наук, доцент,
руководитель Лаборатории технологии
и техники бурения скважин в условиях станции Восток,
научный центр «Арктика»,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, Россия,
Bolshunov_AV@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3879-7380>



Alexey V. Bolshunov,
Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Laboratory of Technology
and Drilling Equipment in Vostok Station Conditions,
Arktika Research Center,
Associate Professor,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia,
Bolshunov_AV@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3879-7380>

Вклад авторов / Contribution of the authors

В.С. Шадрин – написание текста статьи и выполнение исследований.
В.Я. Климов – разработка методологии работы и написание текста статьи.
А.В. Большунов – разработка концепции статьи.
Vyacheslav S. Shadrin performed the research and wrote the text of the article.
Vladimir Ya. Klimov developed the article methodology and wrote the text of the article.
Aleksey V. Bolshunov developed the concept of the article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов 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 11.07.2024; одобрена после рецензирования 20.09.2024; принята к публикации 24.09.2024.

The article was submitted 11.07.2024; approved after reviewing 20.09.2024; accepted for publication 24.09.2024.