



Научная статья

Результаты комплексных экспериментальных исследований на станции Восток в Антарктиде

А.В.БОЛЬШУНОВ, Д.А.ВАСИЛЬЕВ ✉, А.Н.ДМИТРИЕВ, С.А.ИГНАТЬЕВ,
В.Г.КАДОЧНИКОВ, Н.С.КРИКУН, Д.В.СЕРБИН, В.С.ШАДРИН

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Большунов А.В., Васильев Д.А., Дмитриев А.Н., Игнатьев С.А., Кадочников В.Г., Крикун Н.С., Сербин Д.В., Шадрин В.С. Результаты комплексных экспериментальных исследований на станции Восток в Антарктиде // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 724-741. EDN WQNJET

Аннотация. Научные исследования в районе российской антарктической станции Восток ведутся с дня ее основания 16 декабря 1957 г. Актуальность проведения работ по изучению региона неуклонно возрастает, что подтверждается Стратегией развития деятельности Российской Федерации в Антарктике до 2030 года. В рамках реализации Стратегии Санкт-Петербургский горный университет решает задачи комплексного исследования района станции Восток, включая подледниковое озеро Восток, связанные с разработкой современных технологий и технических средств бурения ледников и подстилающих горных пород, вскрытия подледниковых водоемов, отбора проб воды и донных отложений, а также с проведением комплексных геолого-геофизических исследований. Для успешной реализации Стратегии на каждом этапе выполнения работ необходимо выявление и развитие междисциплинарных связей при соблюдении требований по минимизации воздействия на окружающую среду. В сезон 68-й Российской антарктической экспедиции сотрудниками Горного университета наряду с текущими были начаты исследования динамических взаимодействий между силами Земли, от самых глубоких недр до поверхности ледника. Выполнены буровая и научно-исследовательская программы. Буровая программа реализована совместно с коллегами из Арктического и антарктического научно-исследовательского института на буровом комплексе скважины 5Г. Научно-исследовательская программа включала: малоглубинные сейсмические исследования, колонковое бурение снежно-фирновой толщи, изучение петроструктурных особенностей снежно-фирновой толщи, исследования эффективности шламособорных фильтров при бурении снежно-фирновой толщи и процесса разрушения льда возвратно-вращательным способом, стендовые испытания акустического сканера. В результате проведения буровых работ в скважине 5Г на интервале глубин 3453,37-3534,43 м получен керн льда возрастом более 1 млн лет. В научно-исследовательских работах реализован междисциплинарный подход к изучению снежно-фирновой толщи, позволивший проанализировать достоверность результатов, достигнутых разными методами. Получены данные, необходимые для разработки новых технологий бурения ледников.

Ключевые слова: Антарктида; станция Восток; ледяной покров; бурение; научно-исследовательские работы; междисциплинарные связи

Благодарность. Исследование выполнено с помощью субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2023 г. № FSRW-2021-0011.

Поступила: 16.08.2023

Принята: 20.10.2023

Онлайн: 27.10.2023

Опубликована: 27.10.2023

Введение. Более 65 лет район антарктической станции Восток является центром притяжения исследований в области наук о Земле. С момента основания станции в 1957 г. советскими и российскими учеными велись непрерывные работы по изучению атмосферы, ледового купола и подстилающих горных пород Антарктического континента. В 1970 г. учеными Ленинградского горного института (ныне Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II) совместно с сотрудниками Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) было начато бурение глубоких скважин во льду, которое продолжается и в настоящее время [1]. На сегодняшний день на станции Восток пробурено более 13000 м глубоких скважин, керновый материал которых является источником уникальной первичной информации при проведении фундаментальных исследований в области гляциологии, палеоклиматологии, геологии и



микробиологии. Именно благодаря ледяному керну со станции Восток была установлена непрерывная последовательность данных об изменениях газового состава атмосферы и климата за последние 420 тыс. лет [2]. Изучение минеральных включений, встречающихся в ледяном керне, размер которых достигает 8 мм, позволило сделать выводы о геологическом составе подледниковых горных пород Центральной Антарктиды [3].

Стремительный прогресс буровых работ в середине 90-х годов и близость одного из важнейших достижений науки XXI в. – вскрытия подледникового озера Восток – продиктовали необходимость проведения комплексных геофизических исследований в районе станции Восток. В результате скважинных исследований российскими геофизиками были установлены скорости распространения сейсмических и электромагнитных волн во льду, а также измерена толщина ледника в месте предполагаемого вскрытия озера [4]. В ходе работ для решения задач картирования и изучения глубинного строения в районе озера Восток, проводимых совместно с учеными из Италии и США, были установлены данные о площади, объеме, глубине и высотном положении озера [5].

Несмотря на продолжительные исследования, Антарктида остается наименее изученным континентом, необходимость и актуальность научных исследований которого закреплены распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 июня 2021 г. № 1767-р «Об утверждении плана мероприятий по реализации Стратегии развития деятельности Российской Федерации в Антарктике до 2030 года». Санкт-Петербургский горный университет принимает участие в реализации 21-го Мероприятия «Комплексные исследования подледникового озера Восток и палеоклимата Земли в районе российской антарктической станции Восток», в рамках которого необходимо решить спектр научно-исследовательских, опытно-конструкторских и организационных задач.

В рамках сезона 68-й Российской антарктической экспедиции сотрудниками Горного университета наряду с текущими были начаты исследования динамических взаимодействий между силами Земли, от самых глубоких недр до поверхности ледника. Эти исследования направлены на подтверждение новых знаний, полученных учеными [6], и касаются изучения поведения самых глубоких слоев нашей планеты с помощью сейсмических волн в условиях Антарктиды. Выполнены совместная с ААНИИ буровая и собственная научно-исследовательская программы, основные площадки которых показаны на рис.1.

Бурение глубокой скважины 5Г-5 с целью получения керна древнего льда проводилось на буровом комплексе имени профессора Б.Б.Кудряшова.

Научно-исследовательская программа, направленная на изучение снежно-фирновой толщи и создание новых технических средств бурения ледников, включала следующие работы: малоглубинные сейсмические исследования; колонковое бурение снежно-фирновой толщи; исследование петроструктурных особенностей снежно-фирновой толщи; исследование эффективности шламоборных фильтров при бурении снежно-фирновой толщи; исследование процесса разрушения льда возвратно-вращательным способом; стендовые испытания акустического сканера.

Эксперименты, связанные с созданием новых технических средств бурения ледников, выполнялись в лабораториях бурового комплекса скважины 5Г с учетом термобарических условий станции Восток. Особое внимание уделялось установлению междисциплинарных связей между бурением скважин, геофизическими и петрофизическими исследованиями ледника.

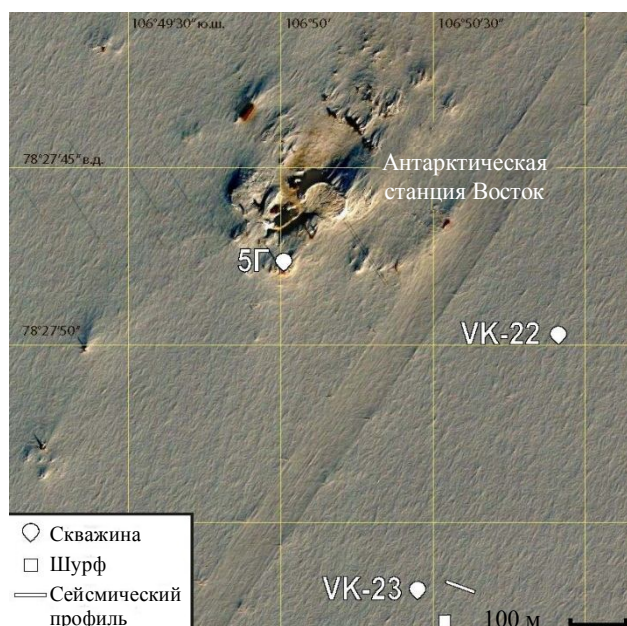


Рис.1. Площадки научно-исследовательских работ Горного университета в сезон 68-й РАЭ в районе станции Восток (<https://www.google.com/maps>)



Сотрудники Горного университета совместно с коллегами из ААНИИ при бурении льда в скважине 5Г-5 выполнили 90 рейсов, которые распределились по назначению следующим образом: 57 – бурение; 10 – расширение; 9 – извлечение керосина; 7 – доставка фреона; 7 – геофизические исследования скважины.

В результате буровых работ получено 81,06 м кернового материала с интервала глубин 3453,37-3534,43 м при средней рейсовой проходке 1,42 м и 100 %-ным выходом керна. В результате бурения скважины 5Г-5 был извлечен керн возрастом более 1 млн лет [2]. Проведен комплекс геофизических исследований в скважине 5Г (ГИС), который выполнялся до начала и после окончания буровых работ и включал термометрию, барометрию, кавернометрию, инклинометрию. Данные ГИС позволили оценить изменения технического состояния скважины, произошедшие после сезона 67-й РАЭ, спланировать и провести комплекс мероприятий (расширение, доставка фреона, извлечение керосина), необходимых для обеспечения безаварийной работы в скважине.

Для изучения характеристик снежно-фирновой толщи ледника была пробурена неглубокая скважина VK-23 с отбором кернового и шламового материала, а также выкопан шурф глубиной 3 м. Шурф располагался в 100 м на северо-восток от скважины VK-23 и был ориентирован на восток. После зачистки и зарисовки шурфа на его рабочей стенке была установлена рулетка и сотрудниками Лаборатории изменений климата и окружающей среды ААНИИ (ЛИКОС) и Горного университета выполнено стратиграфическое описание рабочей стенки, проведен отбор проб для анализа химического состава, содержания космогенных и стабильных изотопов, измерена плотность снежно-фирновой толщи.

1. Малоглубинные сейсмические исследования. В Антарктиде одним из наиболее востребованных методов геофизических исследований является сейсморазведка, которая позволяет определить мощность ледника, подледный рельеф, толщину слоя воды, глубину залегания сейсмо-геологических границ, их падение и простираие, а используя геологические данные [7, 8], установить геологическую природу выявленных границ [5]. Наибольшие трудности при выполнении сейсмического зондирования возникают по причине наличия приповерхностного мощного снежно-фирнового слоя, в котором акустическая волна затухает [9, 10]. В то же время волны, возникающие после взрыва в снежно-фирновом слое и распространяющиеся вдоль его поверхности, характеризуются высокой интенсивностью и слабо затухают по мере удаления от источника возбуждения, что маскирует целевые отражения [4, 11]. Несмотря на большой объем проведенных исследований, изучение распространения упругих волн в снежно-фирновом горизонте является актуальной задачей, на решение которой были направлены опытно-методические работы в сезон 68-й РАЭ на станции Восток. Первоначально проводилась проверка работоспособности сейсмической аппаратуры в районе станции Прогресс, затем опытно-методические работы в районе станции Восток.

Методы. Целью опытно-методических работ являлось изучение возможности проведения сейсморазведочных исследований снежно-фирновой толщи в климатических и горно-геологических условиях района станции Восток с использованием бескабельной телеметрической сейсморегистрирующей системы (СБТС) «SCOUT» (разработка АО «СКБ СП», Саратов). Работы включали: определение среднего времени работы автономных аккумуляторных модулей в условиях низких отрицательных температур без подзарядки; опробование методик работы с СБТС «SCOUT» в условиях Антарктиды; оценку удобства полевых работ с планшетным компьютером для управления СБТС «SCOUT» в условиях низких отрицательных температур.

На станции Восток была проведена оценка работоспособности бескабельных автономных регистраторов (БАР) в условиях отрицательных температур, которая выполнялась при температуре -50°C в течение 55 ч. Установлено, что максимальная интенсивность разрядки аккумуляторных батарей БАР приходится на первые 6 ч и составляет 10-11 % (рис.2). Время разрядки аккумуляторных батарей БАР при температуре -50°C находится в диапазоне 80-120 ч и составляет 30-50 % от их максимальной длительности регистрации в автономном режиме при нормальных условиях.

В качестве источника возбуждения упругих волн применялся удар кувалды по наковальне (металлической плашке). Во время опытно-методических работ на станции Прогресс в качестве плашки использовался стальной прямоугольный брусок весом около 13 кг. Недостатки такой

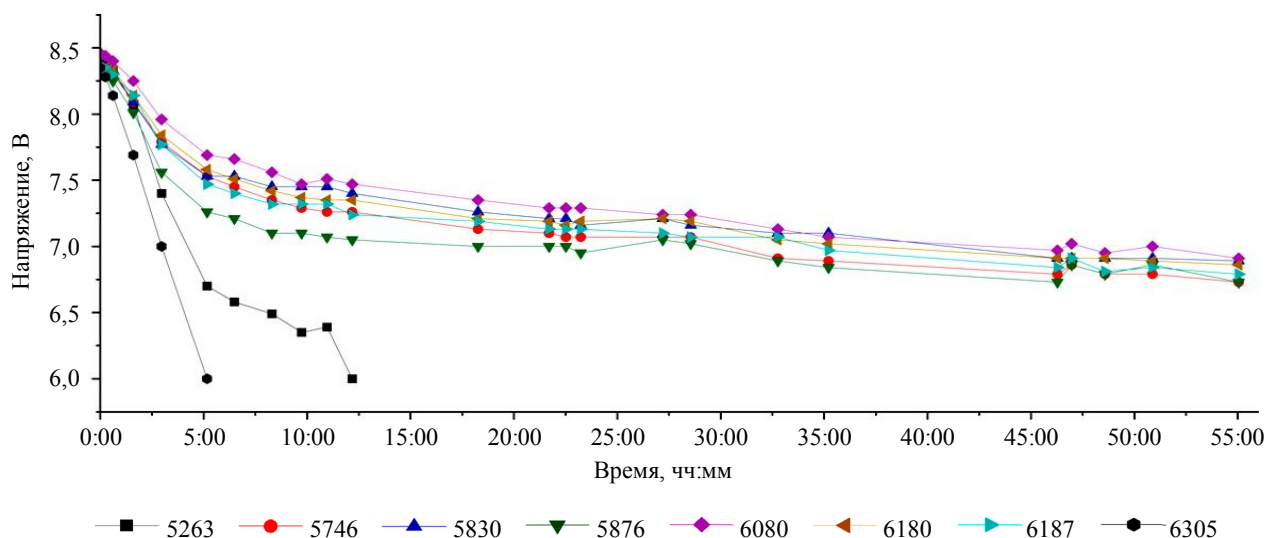


Рис.2. График изменения заряда аккумуляторных батарей БАР при температуре окружающей среды -50°C , номер линии – заводской номер БАР

плашки – большая масса и сильное заглубление в рыхлые горные породы, в том числе снег, во время удара, что затрудняет проведение сейсмических работ. Во время опытно-методических работ на станции Восток в качестве плашки сначала использовались стальные круглые блины, но они раскололись от ударов кувалды и также заглублялись (рис.3, б, в).

По результатам проведенных работ было реализовано техническое решение, направленное на устранение недостатков в конструкции испытанных источников возбуждения упругих волн (рис.3, з, д). В качестве плашек были выбраны две стальные болванки толщиной 90 и 110 мм и диаметром 146 и 110 мм, соответственно. Во избежание заглубления плашек к нижнему торцу каждой болванки приваривался стальной палец с резьбой, на который надевался стальной круг толщиной 2 мм и диаметром 600 мм и прижимался гайками. Новая конструкция источников возбуждения упругих волн позволила обеспечить плотное соединение ее элементов, исключая появление дополнительных вибраций, и увеличить площадь контакта источника со снежной поверхностью, не позволяющую плашкам углубляться при ударах во время геофизических исследований (рис.3, а).

Обсуждение результатов. В ходе опытно-методических работ было выполнено семь профилей, из них: три – холодные

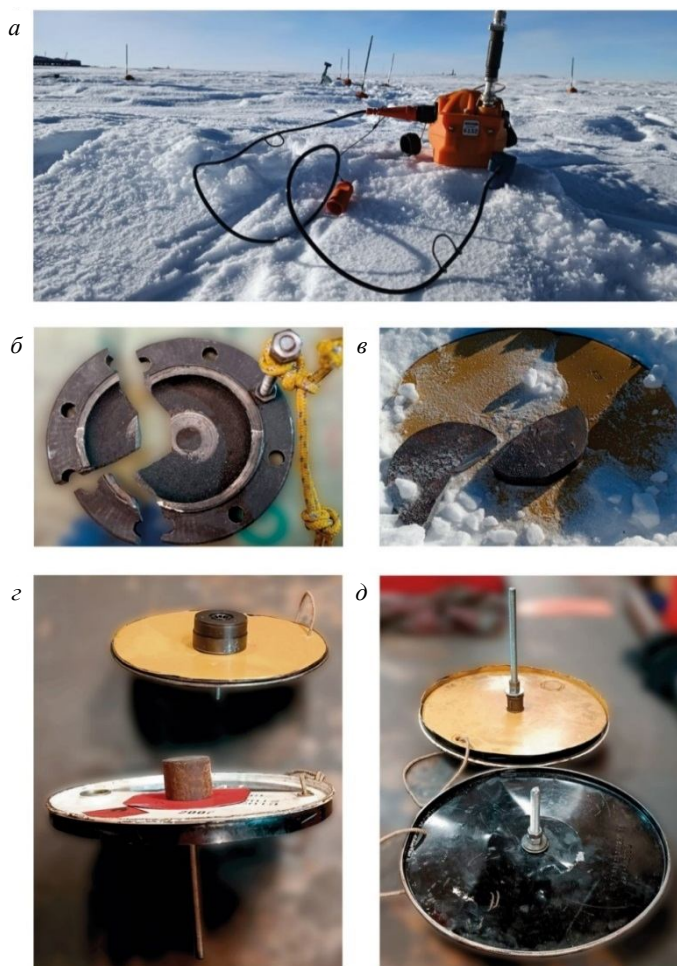


Рис.3. Проведение опытно-методических работ вблизи станции Восток (а). Конструкции плашек: б – расколотая плашка толщиной 12 мм; в – толщиной 30 мм; з – плашки толщиной 110 мм (верхняя) и 90 мм (нижняя) с приваренными стальными пальцами и закрепленными стальными кругами диаметром 600 мм; д – плашки толщиной 110 мм (верхняя) и 90 мм (нижняя) (вид снизу)



снежно-фирновые отложения (станция Восток); два – теплые снежно-фирновые отложения (станция Прогресс); два – рыхлые терригенные отложения (станция Прогресс) (табл. 1).

Таблица 1

Малоглубинные сейсмические исследования в Антарктиде в сезон 68-й РАЭ

Параметр	Значения						
Район проведения работ	Прогресс 09.01.2023				Восток 06.02.2023		
Температура воздуха, °С	–6				–45		
Атмосферное давление, мм рт.ст.	745				470		
Ветер, м/с	0 (штиль)				6-8		
Номер профиля	1	2	3	4	5	6	7
Расстановка (П – профиль, К – крест)	П	П	П	П	П	П	К
Тип грунта	Мокрый (теплый) снег		Терригенные отложения		Холодные снежно-фирновые отложения		
Шаг пунктов приема, м	2	10	2	10	5	10	5
Шаг пунктов возбуждения, м	2	10	2	10	5	10	5
Шаг дискретизации, мс	2	2	2	2	2	2	2
Длина записи сигнала, с	3	3	3	3	3	3	3
Количество ПП, шт	7	7	7	7	7	7	7

Обработка полученных сейсмических данных была выполнена на кафедре геофизики Горного университета доцентом Г.Д.Гореликом для профиля № 6 методом преломленных волн (МПВ). В заголовки трасс введена геометрия наблюдений: координаты пунктов приема и пунктов возбуждения,

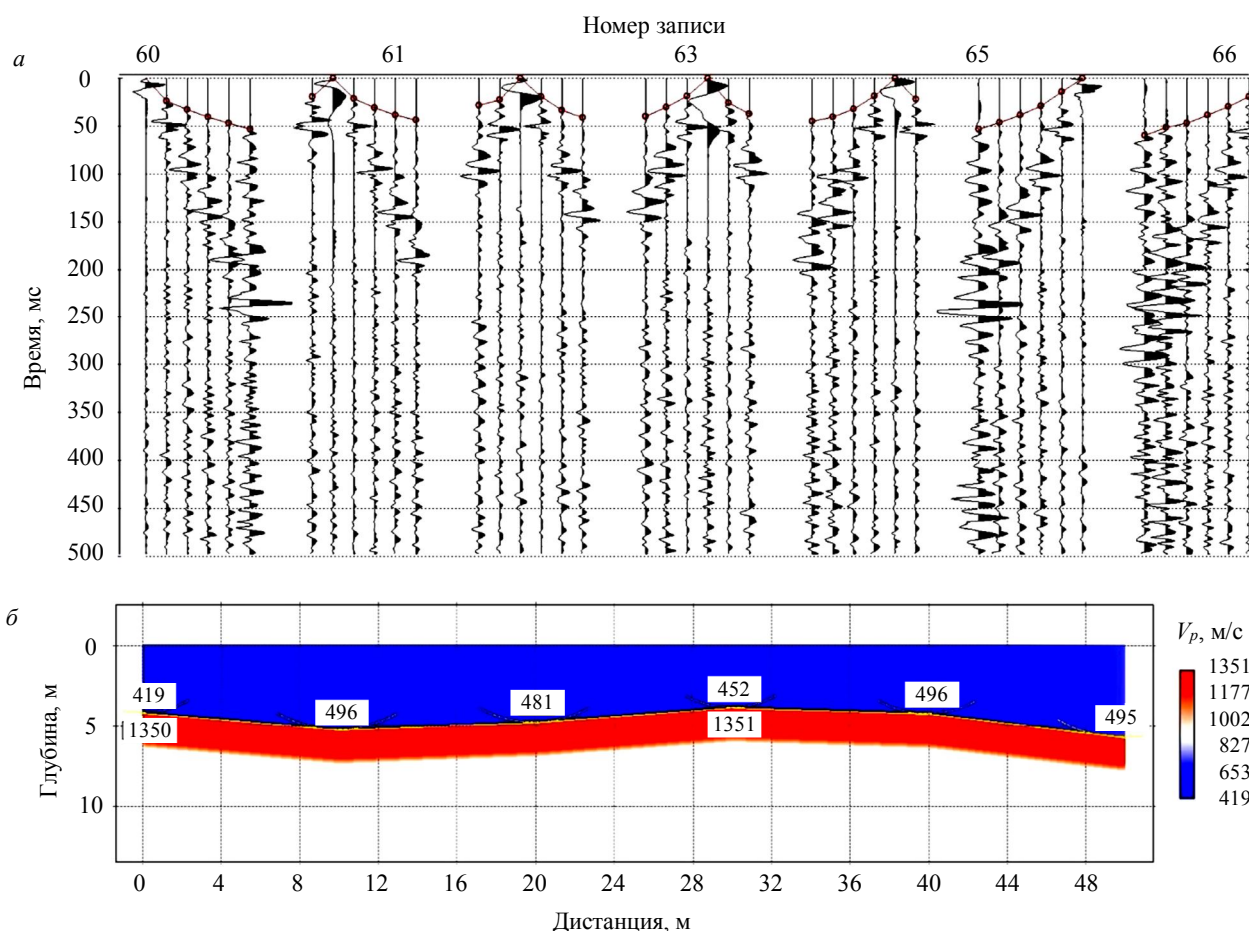


Рис.4. Сейсмограммы (а), зарегистрированные на профиле № 6 и глубинно-скоростной разрез (красная линия – годограф первых вступлений) (б), полученный в результате обработки данных МПВ; V_p – скорость продольных волн



рассчитаны удаления. Для каждой сейсмической трассы выполнена регулировка амплитуд с применением программного пакета обработки сейсмических данных «SeisPro», затем отпикеровано время первого вступления (рис.4, а). Полученные годографы были экспортированы в модуль «Easy Refraction», который предполагает ручное выделение переломов годографов первых вступлений и оценку скоростей распространения волн непосредственно геофизиком-обработчиком. В результате обработки МПВ была установлена преломляющая граница на глубине около 5 м (рис.4, б), что согласуется с данными бурения скважин и соответствует глубине уплотнения снежно-фирнового слоя. Определена скорость волн в приповерхностной части разреза (глубины 0-5 м), которая находится в пределах 450-600 м/с, а в уплотненной части (глубины больше ~ 5 м) – около 1350 м/с.

Выводы. Анализ и интерпретация данных геофизических исследований в Антарктиде, полученных в сезон 68-й РАЭ, позволяют сделать следующие выводы:

- В условиях Восточной Антарктиды при температуре окружающей среды -50°C СБТС «SCOUT» работоспособна в течение 4-5 сут. и позволяет регистрировать сейсмические колебания с использованием электродинамических сейсмоприемников.

- Глубинность сейсмических исследований составила 10 м, что в 4-5 раз меньше длины расстановки профиля.

- В полевых условиях Антарктиды (станции Прогресс и Восток) встроенные модули навигационной системы GPS оказались эффективны – подключение БАР к системе GPS происходило автоматически за 2-5 с.

- При тестировании геофизического комплекса зарегистрированы существенные отклонения (более 20 %) показаний температурных датчиков при температуре -50°C .

- Полученная в ходе опытно-методических работ информация позволила не только оценить физические свойства снежно-фирнового слоя, но и установить необходимый комплекс мероприятий для продолжения сейсмических исследований в районе станции Восток.

2. Колонковое бурение снежно-фирновой толщи. Комплексное изучение ледникового покрова Антарктиды, а также подледниковой материковой платформы невозможно без бурения снежно-фирновой толщи. Бурение верхних слоев антарктического ледника проводится в целях геофизических, сейсмических, гляциологических, микробиологических и других видов исследований [12].

В настоящее время сотрудниками Горного университета ведется обоснование и разработка технологии бурения снежно-фирновой толщи с применением воздуха в качестве очистного агента. При создании новой технологии учитываются физико-механические свойства снежно-фирновой толщи, а также предыдущий опыт применения воздуха в качестве очистного агента при бурении льда. К основным свойствам снежно-фирновой толщи можно отнести низкую плотность, высокую пористость и проницаемость. Плотность снежно-фирновой толщи постепенно возрастает с увеличением глубины залегания, что было многократно подтверждено при построении профилей плотности по результатам колонкового бурения [13]. Пористая проницаемая структура снежно-фирновой толщи, способствующая потере очистного агента в массиве и как следствие разрушению стенок скважины, оказывает наибольшее влияние на процесс бурения. Опыт применения сжатого воздуха при бурении снежно-фирновой толщи показал низкую эффективность буровых снарядов с прямой подачей воздуха на забой из-за катастрофических потерь очистного агента и образования ледяных сальников на буровом оборудовании [14-16]. Применение буровых снарядов на грузонесущем кабеле с обратной призабойной циркуляцией воздуха позволяет существенно повысить производительность, энергоэффективность и безаварийность бурения по сравнению с применяемыми в настоящее время методами шнекового и теплового колонкового бурения.

С целью дополнительного уточнения данных о плотностных характеристиках снежно-фирновой толщи в районе станции Восток, а также отбора проб ледяного шлама для дальнейших экспериментальных исследований в сезон 68-й РАЭ была пробурена скважина VK-23.

Методы. Площадкой бурения была выбрана точка с координатами $78^{\circ}28'18''$ ю.ш. $106^{\circ}50'48''$ в.д., расположенная в 800 м от станции Восток. Расстояние от площадки бурения до сооружений станции, а также до площадки строительства НЗК «Восток» было выбрано таким



образом, чтобы исключить влияние искусственного снегонакопления на интерпретацию результатов буровых работ. Бурение велось с помощью передвижной буровой установкой (ПБУ) LGGE (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement) [17].

Буровая бригада состояла из трех человек: оператор пультов управления, буровик, обслуживающий снаряд, и буровик, извлекающий ледяные керны и производящий сбор образцов ледяного шлама. С каждого бурового рейса (рейсовая проходка была задана 0,5 м) собирались пробы шлама и кернавого материала, далее они упаковывались в отдельные пакеты, которые маркировались в соответствии с номером рейса и интервалом бурения. Шлам и керны доставлялись в подсобные помещения бурового комплекса 5Г, где они хранились при температуре -53°C .

Исследования образцов шлама и кернов проводились в гляциологической лаборатории комплекса 5Г (средняя температура -20°C). Для анализа размера ледяного шлама применялся ситовой метод. Рассев проб методом ситового анализа производился сухим способом с помощью набора ручных лабораторных сит (ГОСТ Р 51568-99) с размерами ячеек: 1,6; 1,25; 1; 0,8; 0,63; 0,4; 0,25 мм. Сита устанавливались в колонну сверху вниз от самой крупной ячейки к самой мелкой. Измерения массы проб (а также последующие измерения массы кернов) проводились с помощью электронных весов с погрешностью $\pm 0,1$ г. Проба шлама подготавливалась методом квартования. Масса одной пробы шлама составляла 0,2 кг, время ссева – 1 мин. Ситовой анализ шлама проводился с интервалом 2 м по глубине скважины. Выход классов крупности в массовом соотношении вычислялся по формуле

$$\gamma = \frac{m_i \cdot 100}{\sum m_i},$$

где m_i – масса класса крупности; $\sum m_i$ – общая сумма масс классов крупности.

Фракционный состав определялся по трем независимым пробам, которые поочередно рассевались на ситах, по результатам ссева выводилось среднее значение для интервала.

Построение профиля плотности снежно-фирновой толщи производилось путем измерения плотности отдельных кернов. Измерения проводились с интервалом 0,5 м по глубине, начиная с глубины 5,5 м (горизонт, с которого начался 100 %-ный выход керна). Плотность керна определялась по формуле

$$\rho_k = \frac{m_k}{\pi \frac{D_k^2}{4} l_k},$$

где m_k – масса керна, кг; D_k – средний диаметр керна, м; l_k – длина керна, м.

Средний диаметр керна рассчитывался как среднее значение трех измерений по длине керна.

Обсуждение результатов. На проходку скважины до глубины 36 м (глубина по керну 35,94 м) суммарно было затрачено 16 ч 50 мин., без учета времени на подготовку площадки бурения и консервацию скважины. Было выполнено 72 рейса, при бурении первых 5,5 м от поверхности получить ненарушенный керн не представилось возможным ввиду малой прочности верхних слоев фирна, с глубины 5,5 м выход керна составил 100 %. С каждого рейса были отобраны образцы ледяного шлама для дальнейших исследований, выход шлама составил около 1 кг на 0,5 м проходки.

Ситовой анализ показал высокую сходимость результатов ссева по скважине VK-23 и VK-22 (пробуренной в сезон 67-й РАЭ [12]), что хорошо видно на рис.5, а. С увеличением глубины скважины шлам становится более мелкозернистым, в нем преобладают мелкие классы крупности, что объясняется структурным строением снежно-фирновой толщи и механизмом ее разрушения.

Измерения плотности массива по добытым ледяным кернам позволило построить профиль плотности скважины VK-23 (рис.5, б). Процесс изменения плотности снежно-фирновой толщи с глубиной в районе бурения скважины VK-23 соответствует общему тренду для скважин, пробуренных в районе станции Восток [13], в частности для скважины VK-22 [12], находящейся в 600 м от площадки бурения VK-23. Из графика видно, что на интервале 5-10 м, который соответствует мелкозернистому фирну, происходит резкое увеличение плотности от 325 до 425 кг/м^3 . Далее

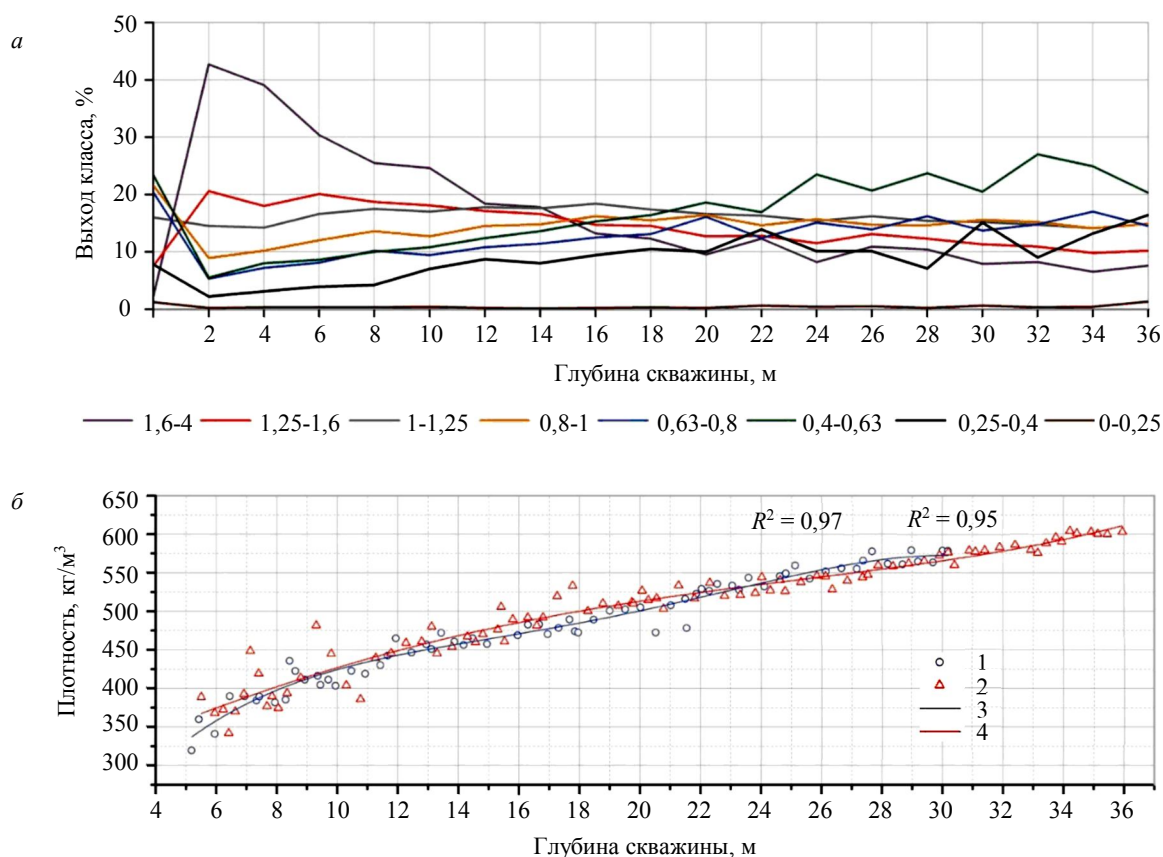


Рис.5. Зависимость изменения гранулометрического состава ледяного шлама из скважины VK-23 с увеличением глубины (а) и профиль плотности снежно-фирновой толщи, построенный по кернам скважин VK-22 и VK-23 (б)

1 – VK-22; 2 – VK-23; 3 – полиномиальная линия тренда (VK-22); 4 – полиномиальная линия тренда (VK-23)

профиль плотности имеет менее дифференцированный характер, при этом градиент плотности уменьшается вплоть до кровли среднезернистого фирна (17 м) и в среднем составляет 15 кг/м^3 на 1 м. В районе отметки 17 м плотность фирна достигает 500 кг/м^3 , затем на глубине 35 м значение плотности превышает 600 кг/м^3 , значения градиента равны $6,2 \text{ кг/м}^3$.

Выводы. Данные, полученные в ходе бурения скважины VK-23, позволяют расширить представление о свойствах снежно-фирновой толщи вблизи станции Восток. Полученная зависимость изменения плотности снежно-фирновой толщи с глубиной дополняет сводный профиль плотности, составленный ранее в ЛИКОС [17], тем самым уменьшая разброс значений и повышая его достоверность. Отбор в ходе бурения образцов ледяного шлама позволил продолжить работы по исследованию процесса бурения снежно-фирновой толщи с продувкой воздухом, начатые в 67-й РАЭ [12]. Последующий гранулометрический анализ позволил получить уникальные данные о зависимости изменения крупности шлама с увеличением глубины бурения, которые будут применены при разработке нового бурового оборудования как отечественными, так и иностранными специалистами.

3. Исследование петроструктурных особенностей снежно-фирновой толщи. В последние годы гляциологические исследования приповерхностной части Антарктического купола сосредоточены на изучении температуры, газовых включений, химического состава и физических характеристик снега и фирна [18-22]. Ведутся исследования по изучению природы процессов, происходящих при уплотнении снега и переходе его в фирн [23]. Анализом кристаллической структуры фирновых отложений занимаются на островах Шпицберген и в Гренландии [24], хотя в большей степени они посвящены изучению подледниковых пород [25]. В районе станции Восток сотрудниками ЛИКОС были выполнены аналогичные работы, но в качестве объекта исследования выступал глетчерный лед, поднятый из глубокой скважины 5Г [26].



Для проведения детальных гляциологических исследований необходимо изучение особенностей геологического строения территории, расчленение полного стратиграфического разреза, выделение пачек и горизонтов со схожим структурным строением. Эти сведения важно учитывать во избежание получения «кажущегося» возраста и геологически абсурдных результатов при геохронологических исследованиях ледового купола Антарктиды [27]. Петроструктурные особенности, вариации структурных и реологических характеристик несут информацию, необходимую для изучения напряженного состояния ледника, построения палеодинамических и палеоклиматических реконструкций. Для исследования физико-механических свойств породы необходимы данные об эволюции размера и формы кристаллов льда, межкристаллических пространственных отношений в пределах всего ледового массива. Необходимо отметить, что недостаточная изученность расчленения стратиграфического разреза снежно-фирновых горизонтов в районе станции Восток, а также границ и факторов перехода снег-фирн и фирн-лед не позволяет достоверно обосновать параметры разрабатываемых буровых технологий и оборудования.

Методы. В ходе сезонных работ 68-й РАЭ была пробурена скважина VK-23 глубиной 36 м. По керну, поднятому из скважины, помимо стыковки, точного измерения длины и плотности было выполнено описание пластин, изготовленных из отдельных кернов, для изучения петроструктурных особенностей фирна в районе станции Восток. Пластины для дальнейшего изучения были выполнены в гляциологической лаборатории. Минимальная толщина отшлифованных пластин, при которой не происходило разрушения фирна и выпадения из него отдельных зерен, была подобрана опытным путем и составила 5 мм.

После изготовления пластины помещались на световой стол для макроскопического описания под поляризационным стеклом. Затем наиболее представительные образцы из керна изучались под микроскопом. Обычно при микроструктурном анализе кернов льда и фирна образцы для изучения отбираются с интервалом в десятки метров [24]. В данном исследовании после того, как было установлено, что микроструктура соседних интервалов отличается незначительно, отбор проб осуществлялся с шагом в 5 м.

Обсуждение результатов. Выполнены петроструктурные исследования снежно-фирновых отложений, отобранных из верхней части разреза Антарктического ледового купола, детальные макро- и микроскопические описания более семи отшлифованных пластин фирна, изготовленных в гляциологической лаборатории. Пример микроскопического описания приведен ниже.

Рейс № 50 (интервал по керну 25-25,5 м). Фирн среднезернистый, сложен гетерогенной массой, которую условно можно разделить на зерна двух групп. Более 50 % породы выполнено хорошо раскристаллизованными идиоморфными и гиподиоморфными зернами таблитчатой формы, размер которых достигает 2,5-3,0 мм, встречаются крупные изометричные зерна с шестью и четырьмя гранями. Грани четкие, ровные. Увеличивается прозрачность кристаллов, в крупных зернах отмечены газовые включения и единичные трещины, параллельные граням. Вторая группа представлена зернами до 1 мм. Они раскристаллизованы значительно хуже, грани неровные, ломанные. Встречаются удлиненные и вытянутые кристаллы, заполняющие 10-20 % от объема породы, размером до 1 мм. Пластина выпиlena по всему керну, что говорит об увеличении крепости породы.




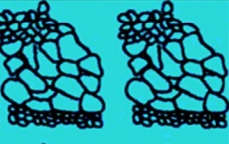
Петроструктурные исследования верхней части снежно-фирновых отложений позволили заполнить стратиграфическое расчленение верхней части разреза ледового купола, основываясь на особенностях гранулометрического состава и структуры пород. Схематический разрез приведен в табл.2. Выявлено четыре горизонта фирновых отложений, в интервалах 0-5; 5-10; 10-18; 18-35 м и более.

Установлено, что с глубиной происходит рост размера зерен фирновых отложений и увеличение доли кристаллов более крупных фракций, что обусловлено процессами перекристаллизации под действием направленного стресса и с течением времени. Рост давления с глубиной обеспечивает улучшение прочностных свойств исследуемых пород и повышение их плотности. Это коррелирует с общей особенностью большинства физических и структурных характеристик льда, слагающего Антарктический ледниковый покров, которая заключается в эволюционном изменении слоев ледяной породы в процессе уплотнения и метаморфизма [13]. При этом на глубине 10 м



Таблица 2

**Схематический стратиграфический разрез приповерхностной части ледового купола Антарктиды
в районе станции Восток**

Масштаб, м	Колонка	Мощность, м	Характеристика подразделений
5		5	Рыхлая снежно-фирновая толща с прослоями плотных радиационных корок
10		5	Мелкозернистый фирн, сложенный преимущественно зернами размером 1 мм
15		~8	Мелко-среднезернистый фирн, сложенный преимущественно зернами размером 1,2 мм и агломератами до 2,5 мм
20		> 18	Среднезернистый фирн, состоящий из зерен размером до 3 мм, с межзерновым пространством, заполненным зернами до 1 мм
25			
30			
35			

можно провести условную границу, которая соответствует окончанию литогенеза и началу метаморфизма. Это обуславливается тем, что керн, поднятый из нижележащих интервалов, имеет гранобластовую структуру, характерную для метаморфических горных пород. В интервале 10-17 м еще наблюдаются реликтовые зернистые структуры, типичные для терригенных отложений, но с глубиной их контрастность значительно падает.

Выводы. В приповерхностной части разреза Антарктического ледового купола выделено четыре горизонта снежно-фирновых отложений, характеризующихся различными петроструктурными особенностями и плотностными свойствами (рис.5, б). Положение геологических границ на глубинах ≈ 5 и 10-12 м подтверждается результатами проведенных поверхностных сейсмических работ, на указанных интервалах отмечается значительное увеличение скорости прохождения упругих волн (см. рис.4, б).

В дальнейшем планируется провести аналогичные исследования на удалении от скважины ВК-23 для корреляции полученных данных и построения структурных карт выделенных горизонтов, заверки полученных результатов по площади. Важную роль здесь могут сыграть физико-механические свойства выделенных горизонтов, которые также стоит учитывать при стратиграфии снежно-фирновых отложений. Необходимо уменьшить толщину шлифов, что позволит увеличить их прозрачность и более детально изучить межзерновое пространство, ориентировку зерен, газовые включения и пустоты.

4. Исследование эффективности шламоборных фильтров при бурении снежно-фирновой толщи. Подбор параметров режима бурения следует осуществлять таким образом, чтобы достигалась полная и своевременная очистка забоя скважины от продуктов разрушения горных пород. Специфика бурения льда снарядами на грузонесущем кабеле [28], когда очистной агент циркулирует в призабойной зоне, дополнительно требует обеспечения высокой эффективности работы шламоборного отсека. Невыполнение данного требования приводит к тому, что шлам, не будучи уловленным из очистного агента (в рассматриваемом случае – сжатого воздуха), повторно



Рис.6. Конструкции шламосборных фильтров: а – общий вид верхней части экспериментального стенда перед испытаниями сетчатого шламосборного фильтра; б – сетчатый шламосборный фильтр (1 – фланец сетчатого фильтра; 2 – шламоподъемная трубка; 3 – сетчатый фильтр; 4 – прозрачная труба из оргстекла; 5 – верхний фланец; 6 – шпильки; 7 – нижний фланец); в – циклонный фильтр с одним входным патрубком (1 – цилиндрическая часть циклона с тангенсальным подводом; 2 – конусная часть циклона; 3 – шламосборный бак; 4 – шламоподъемный шланг); г – циклонный фильтр с двумя и тремя подводами (1 – шламосборный бак; 2 – конусная часть циклона; 3 – верхняя часть циклона с двумя подводами; 4 – верхняя часть циклона с тремя подводами)

поступит в затрубное пространство скважины и осядет на забой, что снижает механическую скорость бурения и может привести к прихвату снаряда.

При реализации отечественных и международных проектов глубокого бурения льда было испытано множество систем шлагоулавливания, которые отличались уникальными конструкторскими решениями, не применявшимися ранее. Так, в буровом снаряде лаборатории CRREL (Cold Regions Research and Engineering Laboratory) был реализован принцип очистки скважины от шлама за счет растворения его в водном растворе этиленгликоля, который находился в специальном баке внутри корпуса снаряда [29]. В снаряде лаборатории LGGE шлам отделялся от заливочной жидкости с помощью центрифуги, которая приводилась в движение от электропривода снаряда [30]. В буровых снарядах JARE (Japanese Antarctic Research Expedition) [31] и HT (Hans Tausen) [32] применялся схожий по своей конструкции механизм уплотнения ледяного шлама при помощи бустера (JARE) или поршневого насоса (HT). Наибольшую эффективность с точки зрения качества улавливания шлама и энергозатрат показали системы, работающие по принципу механической фильтрации, что подразумевает процеживание смеси заливочной жидкости и шлама через фильтрующий элемент (сетки, решетки, мембраны и т.д.). Шламосборные отсеки снарядов КЭМС (колонковый электромеханиче-

ский снаряд) и DISC (Deep Ice Sheet Coring Drill) [33] работают по данному принципу. Несмотря на разнообразие конструкций систем улавливания ледяного шлама и физических процессов, лежащих в основе их работы, не существует четкого представления об эффективности работы данных систем при бурении с продувкой воздухом.

С целью исследования процесса шлагоулавливания при бурении снежно-фирновой толщи с обратной призабойной циркуляцией воздуха в сезон 68-й РАЭ проведены экспериментальные работы, планирование которых было отражено в ранее опубликованных работах [12].

Методы. Идеей экспериментальных исследований являлось нахождение оптимальной конструкции шламосборных фильтров для бурового снаряда с обратной призабойной циркуляцией сжатого воздуха. Исследования проводились на экспериментальном стенде, имитирующем процесс транспортирования ледяного шлама восходящим потоком воздуха внутри бурового снаряда. Для повышения энерговооруженности стенда в его конструкцию была добавлена дополнительная турбина мощностью 2400 Вт, для упрощения загрузки образцов ледяного шлама в конструкцию стенда был добавлен загрузочный лоток.

Подготовлены четыре модели шламосборных фильтров (рис.6). Первая модель представляла собой сетчатый шламосборный фильтр, конструкция которого аналогична конструкции шламосборного фильтра КЭМС-132 (рис.6, а, б).

Ледяной шлам, увлекаемый потоком воздуха, проходя через нижний фланец, поднимается по шламоподъемной трубке, в стенках которой выполнены отверстия. Через эти отверстия шлам падает в полость сетчатого фильтра – латунную сетку, спаянную на двух обечайках и представляющую собой цилиндрическую поверхность. Размер ячейки сетки подобран таким образом, чтобы



сетка была непроницаема для шлама, но проницаема для воздуха. Ледяной шлам, отфильтрованный сеткой, остается в фильтре, а очищенный воздух через отверстия в фланце сетчатого фильтра проходит через мотор-турбину и выбрасывается в атмосферу.

Остальные модели фильтров являлись вариациями циклонных фильтров, работа которых основана на принципе инерционной сепарации (рис.6, в, з). Воздух и взвешенные в нем частицы (шлам) поступают в рабочую полость циклона через входной патрубок, расположенный по касательной к цилиндрической поверхности корпуса цилиндра. Поток воздуха закручивается внутри циклона, центробежная сила, действуя на частицы, отбрасывает их к внутренним стенкам циклона. Соударяясь друг с другом и стенками циклона, частицы оседают в нижней части циклона и скапливаются в бункере. Циклонные фильтры изготовлены с помощью 3D-печати и отличаются друг от друга количеством входных патрубков и геометрией рабочего пространства.

Экспериментальные работы по определению эффективности улавливания шлама выполнялись в следующей последовательности. Модель шламособорного фильтра устанавливалась на экспериментальный стенд. Далее, при помощи загрузочного лотка в основание стенда последовательно подавалась проба шлама (800 г), полученная в ходе буровых работ. При помощи лабораторного автотрансформатора и регулируя частоту вращения мотор-турбины подбиралась скорость воздушного потока, при которой проба без остатка переносилась в фильтр. По окончании эксперимента вращение турбины останавливалось, шламособорный фильтр в сборе снимался со стенда. Эффективность шламособорного фильтра оценивалась по отношению массы уловленного шлама к массе пробы:

$$\eta = \frac{m_y}{m_n} \cdot 100,$$

где m_y – масса уловленного шлама, кг; m_n – масса пробы, кг.

Обсуждение результатов. Эксперименты с сетчатым фильтром показали его низкую эффективность по улавливанию ледяного шлама из восходящего потока сжатого воздуха. Частицы ледяного шлама, попадая в фильтр, продолжали находиться во взвешенном состоянии в турбулентных потоках воздуха, что приводило к их повторному измельчению о латунную сетку фильтра. Измельченные частицы могли свободно проходить через ранее непроницаемую для них сетку, таким образом попадая во вращающиеся части турбины и оседая на стенках стенда. По итогу серии экспериментов средняя эффективность сетчатых фильтров составила 57,8 %, что в совокупности с большими временными затратами на обслуживание и ремонт послужило основанием отказа от их дальнейшего использования в качестве шламособорных фильтров при бурении с продувкой. Циклонные фильтры во всех исполнениях показали высокую эффективность шламоулавливания: циклонный фильтр с одним входным патрубком – 96,3 %; с двумя подводами – 92 %; с тремя подводами – 96,8 %; сетчатый фильтр – 57,8 %. Высокая эффективность циклонных фильтров объясняется тем, что шлам по крупности относится к классу –I (очень крупнодисперсной пыли), что соответствует области рационального применения пылеуловителей циклонного типа (Рекомендации по проектированию и очистке воздуха от пыли в системах вытяжной вентиляции. М: Стройиздат, 1985).

Выводы. Высокая эффективность циклонных фильтров доказывает перспективность их применения при бурении снежно-фирновой толщ с обратной призабойной циркуляцией воздуха. Логическим продолжением работ в данном направлении является более детальное исследование, включающее в себя испытания с более широким спектром конструкций циклонов, скоростных диапазонов потока воздуха и проб ледяного шлама с различных горизонтов бурения.

5. Исследование процесса разрушения льда возвратно-вращательным способом. Первые работы по созданию принципиально нового технического средства для бурения подледниковых пород и отбора проб донных отложений – динамически уравновешенного бурового снаряда (ДУБС), были проведены в Горном университете более 15 лет назад [34]. Отличительной особенностью ДУБС является отсутствие распорной системы, воспринимающей реактивный момент при возвратно-вращательном движении породоразрушающего инструмента с высокой частотой и амплитудой колебаний. Были подробно рассмотрены вопросы, связанные с исследованием динамических процессов в электромеханической системе [34, 35], а процесс разрушения горных пород возвратно-вращательным способом не был изучен.

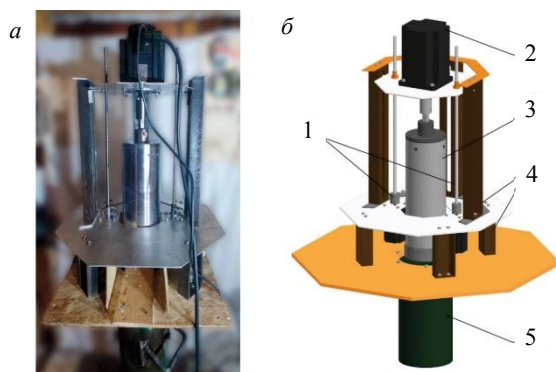


Рис.7. Физическая (а) и цифровая (б) модели экспериментального стенда для исследования процесса разрушения льда возвратно-вращательным способом
1 – механизм подачи колонкового набора; 2 – электропривод вращения колонкового набора; 3 – колонковый набор; 4 – несущая рама; 5 – искусственный забой

Для исследования процесса разрушения льда, подледниковых пород и донных отложений возвратно-вращательным способом создан экспериментальный стенд, первая апробация которого была выполнена при бурении льда в буровом комплексе профессора Кудряшова на станции Восток в сезон 68-й РАЭ.

Методы. Испытание экспериментального стенда в условиях станции Восток проводилось для оценки работоспособности его конструкции и подготовки технического задания на разработку систем контроля и телеметрии (рис.7).

Испытание экспериментального стенда проходило в следующей последовательности: монтаж экспериментального стенда; проведение пуско-наладочных работ и оценка работоспособности конструкции и системы управления; устранение обнаруженных

недостатков с использованием технических возможностей бурового комплекса профессора Кудряшова; проверка работоспособности породоразрушающего инструмента с двусторонними резцами при бурении скважин во льду возвратно-вращательным способом; подготовка технического задания на модернизацию стенда и разработку систем контроля и телеметрии с учетом полученных результатов.

Обсуждение результатов. Основным результатом экспериментальных исследований процесса разрушения льда возвратно-вращательным способом стало установление факта его применимости при бурении ледников. Проведено три тестовых эксперимента, направленных на проверку работоспособности экспериментального стенда и выявление недостатков конструкции, а также четыре эксперимента со 100 %-ным выходом образца керна льда.

Бурение возвратно-вращательным способом выполнялось со следующими установленными режимными параметрами бурения: частота вращения буровой коронки – 150 об/мин; частота колебаний буровой коронки – 1 Гц; амплитуда колебаний коронки – 210 град; скорость подачи колонкового набора на забой – 4,8 м/ч. За 5 мин бурения возвратно-вращательным способом был получен керн диаметром 110 мм и длиной 220 мм, что соответствует проходке со скоростью 2,64 м/ч.

В ходе проверки работоспособности экспериментального стенда были выявлены следующие недостатки: высокая металлоемкость; недостаточная жесткость несущей рамы; слабая визуализация и контроль процесса разрушения льда; неэффективность системы шламоудаления; незащищенность силовых цепей и цепей управления от попадания шлама; некорректная работа программного обеспечения в условиях низких температур. Несмотря на выявленные недостатки, стенд показал свою применимость при исследовании процесса разрушения льда возвратно-вращательным способом, что подтверждается полученным кернавым материалом.

Выводы. Выявленные недостатки планируется устранить в ходе модернизации стенда. Дальнейшие работы включают: модернизацию несущей рамы с увеличением жесткости и снижением металлоемкости; разработку системы телеметрии и контроля режимных параметров бурения (амплитуды и частоты колебаний породоразрушающего инструмента, расхода промывочной жидкости); усовершенствование системы удаления шлама с забоя; разработку коронок с различной геометрией с учетом граничных условий напряженно-деформированного состояния ледового массива.

В дальнейшем на модернизированном экспериментальном стенде планируется проведение исследований процесса разрушения подледниковых пород возвратно-вращательным способом. Результаты исследований будут использованы при разработке буровых снарядов и бурового инструмента для бурения подледниковых пород с учетом их физико-механических свойств.

6. Стендовые испытания акустического сканера. Сущность акустического каротажа (АК) сводится к возбуждению в скважине упругих волн ультразвукового и звукового диапазона, которые



распространяются по горным породам и буровому раствору (заливочной жидкости) и принимаются одним или более приемниками, расположенными в той же скважине. Волна, достигая границы раздела двух сред с различными упругими свойствами, делится на две составляющие – отраженную и проходящую волны. Конструктивно излучатель и приемники объединены в одном скважинном модуле, который может быть установлен в компоновку бурового снаряда или геофизического комплекса или являться отдельным снарядом. Измерения проводятся как в процессе бурения, так и по его завершению [36].

Адаптация акустических исследовательских систем для условий Антарктиды является актуальной научно-практической задачей, решение которой, в том числе и на станции Восток, позволит осуществить [37-39]: непрерывную профилометрию и кавернометрию по всему стволу скважины; построение геометрической модели скважины; определение трещиноватых участков в приствольном пространстве скважины; поиск включений горных пород во льду; оценку качества крепления обсадной колонны в ледовом массиве; изучение особенностей распространения упругих волновых полей в различных типах льда в естественном залегании; изучение физико-механических свойств горных пород в естественном залегании и технологических жидкостей в скважине [40-42].

Предполагаемая технология исследования подледникового озера Восток подразумевает образование тепловым способом локальной полости (каверны) на нижнем участке скважины для контролируемого подъема в нее озерной воды при вскрытии озера. При этом акустический каротаж планируется использовать для получения данных, необходимых при оперативном прогнозировании и моделировании процессов охлаждения и замерзания озерной воды в расширенном участке скважины.

Первым этапом опробования (внедрения) акустических методов исследования скважин на станции Восток являются стендовые испытания ультразвукового сканера «Сканер-2000» производства АО «НПО «Поиск», работающего на принципе отраженных волн. В сезонные работы 64-й РАЭ проводились стендовые и скважинные испытания ультразвукового сканера на буровом комплексе профессора Кудряшова на станции Восток, выявившие ряд существенных недостатков, которые производитель постарался устранить за счет модернизации программного обеспечения.

Методы. Дальнейшие стендовые испытания ультразвукового сканера проводились в сезон 68-й РАЭ на специально собранном стенде (рис.8) и были выполнены в два этапа:

- Измерения диаметров тарировочных емкостей по окружности проводились в стандартных металлических бочке и полубочке диаметром 0,56 м и в металлическом стакане диаметром 0,30 м и направлены на проверку работоспособности оборудования и определение скорости звука при положительных и отрицательных температурах заливочной жидкости и окружающей среды.

- Определение размеров и формы каверны в ледяном блоке, образованном во время экспериментальных исследований в сезон 64-й РАЭ с использованием термогидравлического бурового снаряда – расширителя 90/180 (ТБСР).

Рабочие параметры акустического сканнера подбирались вручную последовательно в режиме измерения «Радиус». В каждом тестовом измерении при заданном импульсе (микро, 1, 5, 20) изменялась его мощность путем дискретного перемещения бегунка по шкале мощности импульса с шагом 2 в интервале от 0 до 200 отн.ед. Таким образом, за один поворот устройства вокруг оси на 360° проводилось 100 измерений с различной мощностью импульса.

Время одного измерения по окружности с учетом возвращения модуля на исходную позицию (реверс) составило 130 с, после чего устройство по

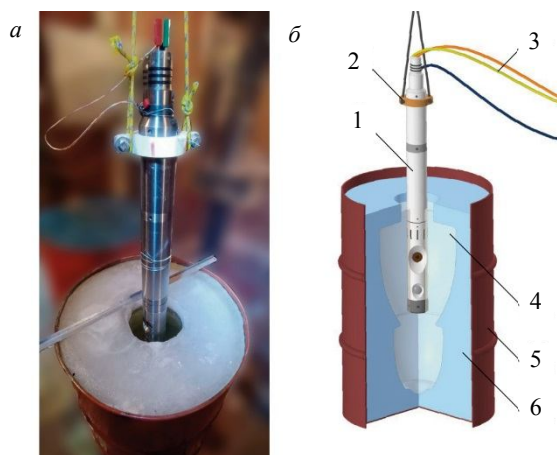


Рис.8. Испытательный стенд геофизического комплекса: а – общий вид; б – 3D-модель

1 – сканер; 2 – подвес; 3 – соединительные провода;
 4 – каверна с рабочей жидкостью; 5 – бочка; 6 – лед



умолчанию переходит в режим измерения «Дно». Измерения температуры заливочной жидкости проводились двумя независимыми способами – низкотемпературным ртутным термометром поплавкового типа и измерительным прибором Fluke с термопарой.

Обсуждение результатов. Первый этап испытаний ультразвукового сканера в тарировочных емкостях дал положительные результаты для металлических бочек и полубочек, но отрицательные для металлического стакана, что предположительно связано с его малыми геометрическими размерами. Получение значения известного диаметра тарировочных емкостей по окружности при заданных условиях проведения испытаний устройства позволило определить зависимость скорости звука от температуры заливочной жидкости, в качестве которой использовался авиационный керосин JET-A-1, применяемый при бурении скважины 5Г.

Второй этап испытаний ультразвукового сканера проводился в каверне, образованной в ледяном блоке термогидравлическим буровым снарядом-расширителем в сезон 64-й РАЭ. Профиль каверны имел прямолинейные и слабонаклонные (конусные, с уклоном не более 10 град) участки, а также участки с резким изменением диаметра (в два раза), что соответствует предполагаемой технологии вскрытия подледникового озера Восток тепловым способом. Измерения диаметра каверны проводились на различных горизонтах с дискретным спуском устройства.

Первые положительные результаты были получены на горизонте 9 при температуре окружающей среды и жидкости -24°C , импульсе – 1 и мощности – 123 (рис.9, а), которая затем была увеличена до 133 (рис.9, б) и до 142 (рис.9, в). Три измерения отличаются друг от друга, а наиболее близким к истинному значению диаметра, определенному механическим ручным каверномером, является второе. При этом ни в одном из трех измерений не наблюдалась четкая граница раздела лед – керосин на кавернограмме. Повторение испытаний через сутки при тех же рабочих параметрах, но с уменьшением температуры окружающей среды и жидкости до -30°C также не дали положительного результата. Впоследствии были получены положительные результаты на горизонтах 7 и 8. Результаты измерений на других горизонтах были отрицательные, что сделало невозможным построить 3D-модель каверны.

В режиме измерения «Дно» положительный результат был получен всего один раз и позволил уверенно определить расстояние от нижнего торца сканера до забоя скважины, равное 0,41 м.

Выводы. В процессе испытаний ультразвукового сканера «Сканер-2000» было произведено более 5 000 измерений для проверки работоспособности и подбора рабочих параметров ультразвукового сканера в ледовой каверне, но только четыре измерения дали уверенный положительный результат, что является неудовлетворительным итогом испытаний устройства, несмотря на

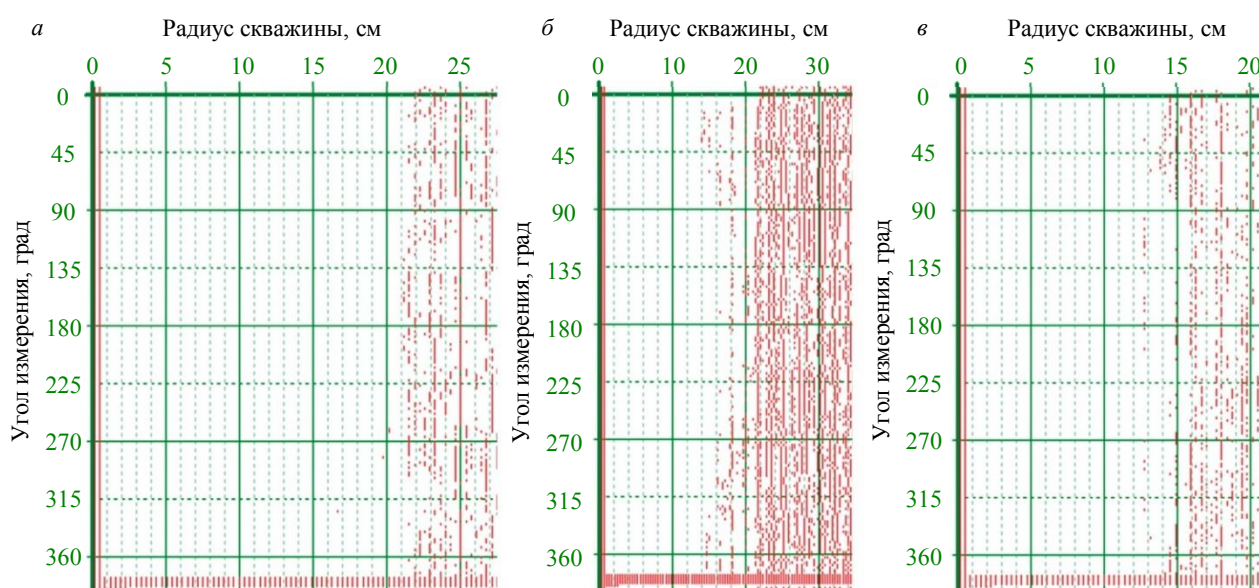


Рис.9. Измерения диаметра ледяной скважины в режиме «Радиус» с включенным двигателем при мощности импульса 123 (а); 133 (б); 142 (в)



проведенную производителем модернизацию. Однако, несмотря на выявленные недостатки в работе устройства, ультразвуковой метод измерения каверн в ледовом массиве для построения их геометрической модели является принципиально применимым.

Необходимо отметить, что для эффективного применения ультразвукового сканера «Сканер-2000» в условиях станции Восток требуется его глубокая доработка, которая должна включать: установку в устройство дополнительных источников и приемников акустических волн; внесение изменений в математико-статистическую обработку данных ПО «Scan Polar»; выявление влияния температурного фактора на корректную работу устройства; обеспечение возможности измерения сложных геометрических поверхностей.

Заключение

В сезон 68-й РАЭ сотрудниками Горного университета совместно с коллегами из ААНИИ выполнена буровая программа в скважине 5Г-5, в результате которой получен ледяной керн, параллельный керну, ранее извлеченному из скважины 5Г-2 [43]. Изучение нового кернового материала современным приборным комплексом позволяет оценить достоверность ранее полученных результатов и приобрести новые научные знания.

Дополнительно к буровым работам выполнены малоглубинные сейсмические исследования и колонковое бурение снежно-фирновой толщи. Исследованы петроструктурные особенности снежно-фирновой толщи и определена эффективность шламособорных фильтров при бурении снежно-фирновой толщи. Исследован процесс разрушения льда возвратно-вращательным способом и проведены стендовые испытания акустического сканера.

Необходимо отметить установление междисциплинарных связей между бурением, геофизическими и петрофизическими исследованиями ледника, а также петроструктурными особенностями слагающих его пород. Полученные в ходе различных изысканий результаты коррелируют друг с другом. Результаты микроскопического анализа петрографической структуры и текстуры фирна позволили выделить четыре горизонта, отличающиеся прочностными и плотностными свойствами. Данная тенденция прослеживается на профиле плотности фирна по керну, извлеченному из неглубокой скважины VK-23 на выделенных интервалах 0-5; 5-10; 10-17; > 17 м. Положение выявленных горизонтов подтверждается результатами поверхностных сейсмических работ, которые показали наличие преломляющих границ на глубинах ≈ 5 и 10-12 м.

Шлам, полученный в процессе бурения снежно-фирновой толщи, был использован при проведении исследований эффективности шламособорных фильтров, в которых учитывались его физико-механические свойства и гранулометрический состав. Результаты показали высокую эффективность фильтров циклонного типа.

Исследование процесса разрушения льда возвратно-вращательным способом показало его эффективность при бурении ледового массива и позволило получить данные для разработки технического задания на проектирование стенда для многофакторного эксперимента по исследованию процесса разрушения не только льда, но и подледниковых пород.

Стендовые испытания акустического сканера «Сканер 2000» позволили выявить недостатки в работе геофизического комплекса при низких температурах в ледовой скважине, заполненной керосином. Результаты испытаний показали, что эхолокационный геофизический метод применим к скважинным условиям Антарктиды, но требует других технологического и технического подходов к определению геометрических характеристик исследуемого объекта.

Анализ проведенных научно-исследовательских работ показал эффективность междисциплинарного подхода к интерпретации данных, полученных разными методами, и повышение достоверности результатов экспериментальных исследований. Междисциплинарный подход особенно актуален при проведении геофизических работ, обусловленных неоднозначностью решения обратных задач геофизики и многообразием петрофизических параметров геологических структур [44-46].



ЛИТЕРАТУРА

1. Litvinenko V. Foreword: Sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Arctic natural resource development // *Geochemistry*. 2020. Vol. 80. Iss. 3. № 125652. DOI: [10.1016/j.chemer.2020.125652](https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125652)
2. Липенков В.Я., Екайкин А.А. В поисках древнейшего льда Антарктиды // *Лед и Снег*. 2018. Т. 58. № 2. С. 255-260. DOI: [10.15356/2076-6734-2018-2-255-260](https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-2-255-260)
3. Leitchenkov G., Antonov A., Luneov P., Lipenkov V. Geology and environments of subglacial Lake Vostok // *Philosophical Transactions of The Royal Society A*. 2016. Vol. 374. Iss. 2059. № 20140302. DOI: [10.1098/rsta.2014.0302](https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0302)
4. Попов С.В. Шесть десятилетий радиолокационных и сейсмических исследований в Антарктиде // *Лед и Снег*. 2021. Т. 61. № 4. С. 587-619. DOI: [10.31857/S2076673421040110](https://doi.org/10.31857/S2076673421040110)
5. Попов С.В., Черноглазов Ю.Б. Подледниковое озеро Восток, Восточная Антарктида: береговая линия и окружающие водоемы // *Лед и Снег*. 2011. № 1 (113). С. 13-24.
6. Yang Y., Song X. Multidecadal variation of the Earth's inner-core rotation // *Nature Geoscience*. 2023. Vol. 16. P. 182-187. DOI: [10.1038/s41561-022-01112-z](https://doi.org/10.1038/s41561-022-01112-z)
7. Mikhalsky E.V., Tkacheva D.A., Skublov S.G. et al. Low-grade Sandow Group metasediments of the Denman Glacier area (East Antarctica): Chemical composition, age and provenance from U-Pb detrital zircon data, with some palaeotectonic implications // *Polar Science*. 2020. Vol. 26. № 100587. P. 1-18. DOI: [10.1016/j.polar.2020.100587](https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100587)
8. Jacobs J., Mikhalsky E., Henjes-Kunst F. et al. Neoproterozoic geodynamic evolution of easternmost Kalahari: Constraints from U-Pb-Hf-O zircon, Sm-Nd isotope and geochemical data from the Schirmacher Oasis, East Antarctica // *Precambrian Research*. 2020. Vol. 342. № 105553. P.1-20. DOI: [10.1016/j.precamres.2019.105553](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105553)
9. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Потков А.М. Отечественные сейсмические, радиолокационные и сейсмологические исследования подледникового озера Восток // *Лед и Снег*. 2012. Т. 52. № 4. С. 31-38. DOI: [10.15356/2076-6734-2012-4-31-38](https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-4-31-38)
10. Сысоев А.П., Горелик Г.Д. Параметрический способ учета неоднородности верхней части разреза при обработке данных МОГТ // *Геология и геофизика*. 2017. Т. 58. № 6. С. 948-954. DOI: [10.15372/GiG20170610](https://doi.org/10.15372/GiG20170610)
11. Господариков А.П., Ревин И.Е., Морозов К.В. Композитная модель анализа данных сейсмического мониторинга при ведении горных работ на примере Кукисвумчоррского месторождения АО «Апатит» // *Записки Горного института*. 2023. Т. 262. С. 571-580. DOI: [10.31897/PMI.2023](https://doi.org/10.31897/PMI.2023)
12. Игнатьев С.А., Васильев Д.А., Большунов А.В. и др. Экспериментальные исследования переноса ледяного шлама воздухом при бурении снежно-фирновой толщи // *Лед и Снег*. 2023. Т. 63. № 1. С. 141-152. DOI: [10.31857/S2076673423010076](https://doi.org/10.31857/S2076673423010076)
13. Екайкин А.А., Чихачев К.Б., Верес А.Н. и др. Профиль плотности снежно-фирновой толщи в районе станции Восток, Центральная Антарктида // *Лед и Снег*. 2022. Т. 62. № 4. С. 504-511. DOI: [10.31857/S2076673422040147](https://doi.org/10.31857/S2076673422040147)
14. Lange G.R. Deep rotary core drilling in ice: Technical Report 94. Hanover, New Hampshire: USA CRREL, 1973. 47 p.
15. Капица А.П. Опыт бурения льда в Антарктиде с очисткой забоя воздухом // Бурение геологоразведочных скважин колонковым способом на примерах забоя воздухом. М.: Госгеолтехиздат, 1958. С. 78-81.
16. Patenaude R.W., Marshall E.W., Gow A.J. Deep core drilling in ice, Byrd Station, Antarctica. Technical Report 60. Wilmette, Illinois: USA SIPRE, 1959. 12 p.
17. Верес А.Н., Екайкин А.А., Липенков В.Я. и др. Первые данные о климатической изменчивости в районе ст. Восток (Центральная Антарктида) за последние 2000 лет по результатам изучения снежно-фирнового керна // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020. Т. 66. № 4. С. 482-500. DOI: [10.30758/0555-2648-2020-66-4-482-500](https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-482-500)
18. Шибаев Ю.А., Чихачев К.Б., Липенков В.Я. и др. Сезонные вариации температуры снежной толщи и теплопроводность снега в районе станции Восток, Антарктида // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019. Т. 65. № 2. С. 169-185. DOI: [10.30758/0555-2648-2019-65-2-169-185](https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-2-169-185)
19. Екайкин А.А., Тебенькова Н.А., Липенков В.Я. и др. Недооценка скорости снегонакопления в центральной части Антарктиды (станция Восток) по данным речных наблюдений // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 2. С. 114-125.
20. Липенков В.Я. Закономерности формирования системы включений воздуха в рекристаллизационном льду // *Криосфера Земли*. 2018. Т. 22. № 2. С. 16-28. DOI: [10.21782/KZ1560-7496-2018-2\(16-28\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2(16-28))
21. Липенков В.Я., Саламатин А.Н. Установившееся распределение пузырьков воздуха по размерам в рекристаллизационном льду // *Лед и Снег*. 2014. Т. 54. № 4. С. 20-31. DOI: [10.15356/2076-6734-2014-4-20-31](https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-4-20-31)
22. Екайкин А.А., Владимирова Д.О., Тебенькова Н.А. и др. Пространственная изменчивость изотопного состава и скорости накопления снега на снегомерном полигоне станции Восток (Центральная Антарктида) // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019. Т. 65. № 1. С. 46-62. DOI: [10.30758/0555-2648-2019-65-1-46-62](https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-1-46-62)
23. Чихачев К.Б., Липенков В.Я. Опыт моделирования нестационарного процесса уплотнения снежно-фирновых отложений в холодной рекристаллизационной зоне льдообразования // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015. № 4 (106). С. 76-87.
24. Machguth H., MacFerrin M., van As D. et al. Greenland meltwater storage in firn limited by near surface ice formation // *Nature Climate Change*. 2016. Vol. 6. № 4. P. 390-395. DOI: [10.1038/nclimate2899](https://doi.org/10.1038/nclimate2899)
25. Sirotkin A.N., Talovina I.V., Duriagina A.M. Mineralogy and geochemistry of alkaline lamprophyres of north-western Spitsbergen (Svalbard) // *Geochemistry*. 2020. Vol. 80. Iss. 3. № 125508. DOI: [10.1016/j.chemer.2019.04.004](https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.04.004)
26. Крикун Н.С., Грохотов Е.И., Волкова В.И. Первичные результаты исследований петроструктурных особенностей приповерхностной части ледового купола Антарктиды и планы на перспективу // *Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородных ресурсов: Тезисы докладов II Международной научно-практической конференции, 7-9 июня 2023, Санкт-Петербург, Россия*. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2023. С. 35.
27. Липенков В.Я., Полякова Е.В., Дюваль П., Преображенская А.В. Особенности строения антарктического ледникового покрова в районе станции Восток по результатам петроструктурных исследований ледяного керна // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2007. № 76. С. 68-77.
28. Кульчицкий А.А., Мансурова О.К., Николаев М.Ю. Распознавание дефектов грузоподъемных канатов металлургического оборудования оптическим методом с помощью нейронных сетей // *Черные металлы*. 2023. № 3. С. 81-88. DOI: [10.17580/chm.2023.03.13](https://doi.org/10.17580/chm.2023.03.13)



29. Ueda H.T., Garfield D.E. Drilling through the Greenland Ice Sheet. Special Report 126. Hanover, New Hampshire: USA CRREL, 1968. 7 p.
30. Donnou D., Gillet F., Manouvrier A. et al. Deep Core Drilling: Electro-Mechanical or Thermal Drill? // Proceedings of the Second International Workshop/Symposium on Ice Drilling Technology, 30-31 Aug 1982, Calgary, Alberta, Canada. USA CRREL, 1984. Spec. Rep. 84-34. P. 81-84.
31. Tanaka Y., Takahashi A., Fujii Y. et al. Development of a JARE deep ice core drill system // Memoirs of National Institute of Polar Research. 1994. Spec. Iss. 49. P. 113-123.
32. Johnsen S.J., Hansen S.B., Sheldon S.G. et al. The Hans Tausen drill: design, performance, further developments and some lessons learned // Annals of Glaciology. 2007. Vol. 47. P. 89-98. DOI: 10.3189/172756407786857686
33. Mason W.P., Shturmakov A.J., Johnson J.A. et al. A new 122 mm electromechanical drill for deep ice-sheet coring (DISC): 2. Mechanical design // Annals of Glaciology. 2007. Vol. 47. P. 35-40. DOI: 10.3189/172756407786857640
34. Загривный Э.А., Поддубный Д.А. Динамически уравновешенный буровой снаряд на грузонесущем кабеле для взятия донных отложений подледниковых озер в Антарктиде // Проблемы механики современных машин: Материалы VII Международной конференции конференции, 25-30 июня 2018, Россия. Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2018. Т. 1. С. 197-201.
35. Загривный Э.А., Поддубный Д.А. Буровой снаряд на грузонесущем кабеле с бездатчиковым управлением авторезонансным электроприводом возвратно-вращательного движения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 3. С. 178-187.
36. Siegert M.J., Makinson K., Blake D. et al. An assessment of deep hot-water drilling as a means to undertake direct measurement and sampling of Antarctic subglacial lakes: experience and lessons learned from the Lake Ellsworth field season 2012/13 // Annals of Glaciology. 2014. Vol. 55. Iss. 65. P. 59-73. DOI: 10.3189/2014AoG65A008
37. Morin R.H., Williams T., Henrys S. et al. Downhole Measurements in the AND-1B Borehole, ANDRILL McMurdo Ice Shelf Project, Antarctica // Terra Antarctica. 2007. Vol. 14. Iss. 3. P. 167-174.
38. Рудаков М.Л., Дука Н.Е. Изучение свойств звукопоглощающих материалов при конструировании средств индивидуальной защиты органа слуха // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 3. С. 165-180. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_165
39. McAfee C.W.I., Rix J., Quirk S.J. et al. Non-contact measurement system for hot water drilled ice boreholes // Annals of Glaciology. 2021. Vol. 62. P. 223-232. DOI: 10.1017/aog.2020.85
40. Van T.N., Thang V.P. et al. A comprehensive method for determining the dewaxing interval period in gas lift wells // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2023. № 13. P. 1163-1179. DOI: 10.1007/s13202-022-01598-8
41. Islamov S.R., Bondarenko A.V., Gabibov A.F., Mardashov D.V. Polymer compositions for well killing operation in fractured reservoirs // Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals. London, UK. Taylor&Francis Group, 2021. P. 343-351. DOI: 10.1201/9781003164395-43
42. Islamov S.R., Bondarenko A.V., Mardashov D.V. A selection of emulsifiers for preparation of invert emulsion drilling fluids // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: Proceedings of the XV International Forum-Contest of Students and Young Researchers under the auspices of UNESCO, May 17-19, 2019, St. Petersburg. Vol. 2. London: Taylor & Francis Group, 2020. P. 487-494. DOI: 10.1201/9781003014638-2
43. Екайкин А.А., Липенков В.Я., Верес А.Н. и др. О возможности реконструкции климатического сигнала в нарушенной записи изотопного состава древнего льда (0,4–1,2 млн лет назад) в керне станции Восток (Центральная Антарктида) // Лед и Снег. 2019. Т. 59. № 4. С. 437-451. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-4-463
44. Егоров А.С., Винокуров И.Ю., Телегин А.Н. Научно-методические приемы повышения геологической и прогнозно-поисковой эффективности государственного геологического картирования российского арктического шельфа // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 447-458. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.447
45. Litvinenko V.S., Kozlov A.V., Stepanov V.A. Hydrocarbon potential of the Ural–African transcontinental oil and gas belt // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2017. Vol. 7. N 1. P. 1-9. DOI: 10.1007/s13202-016-0248-4
46. 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. № 125556. DOI: 10.1016/j.chemer.2019.125556

Авторы: А.В.Большунов, канд. техн. наук, научный руководитель лаборатории, <https://orcid.org/0000-0002-3879-7380> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Д.А.Васильев, инженер-исследователь, Vasilev_DA@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8132-8881> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), А.Н.Дмитриев, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-4615-3179> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), С.А.Игнатьев, канд. техн. наук, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0002-5527-0978> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), В.Г.Кадочников, канд. техн. наук, ведущий инженер, <https://orcid.org/0000-0003-2892-3950> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Н.С.Крикун, ассистент, <https://orcid.org/0000-0003-0350-4987> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Д.В.Сербин, ведущий инженер, permpolitech@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9855-7178> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), В.С.Шадрин, инженер-исследователь, <https://orcid.org/0009-0002-2329-3435> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.