ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Экспериментальное бурение льда с кремнийорганической жидкостью снарядом КЭМС-135 в скважине 5Г (станция Восток, Антарктида)

А.В.Большунов[1]✉, **С.А.Игнатьев**[1], **Д.В.Сербин**[1], **А.В.Туркеев**[2]
[1] *Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** Большунов А.В., Игнатьев С.А., Сербин Д.В., Туркеев А.В. Экспериментальное бурение льда с кремнийорганической жидкостью снарядом КЭМС-135 в скважине 5Г (станция Восток, Антарктида) // Записки Горного института. 2025. Т. 273. № 16749. С. 147-158. EDN VWTPCM

Аннотация
Представлены результаты экспериментального бурения конжеляционного льда в стволе скважине 5Г-5 на станции Восток (Антарктида) с применением колонкового снаряда КЭМС-135 в среде кремнийорганической жидкости ПМС-3. Исследования проводились во время 70-й Российской антарктической экспедиции и были направлены на оценку эффективности технологии при глубоком бурении ледников и вскрытии подледниковых водоемов, а также определение рациональных режимных параметров бурения. Подготовка скважины включала извлечение заливочной жидкости, комплекс геофизических исследований и калибровку ствола. Доставка ПМС-3 на забой осуществлялась с использованием специализированного устройства «Слоник». Экспериментальное бурение конжеляционного льда проходило с применением колонкового снаряда КЭМС-135. Выполнено два буровых рейса с отбором керна длиной 1,10 и 1,14 м, глубина бурения – 3595,15-3597,39 м. Контроль наличия на забое ПМС-3 осуществлялся посредством геофизических исследований и пробоотбора. Особое внимание уделялось анализу режимов бурения, включая механические скорости, характеристики шлама и влияние ПМС-3 на элементы бурового оборудования. Результаты экспериментального бурения показали увеличение механической скорости бурения в среде кремнийорганической жидкости ПМС-3 на 15-20 % по сравнению с используемой заливочной жидкостью (керосин + дихлорфторэтан), а также отсутствие зашламования коронки и улучшение смазывающих свойств жидкости. Определены перспективные направления дальнейших исследований, связанных с оптимизацией конструкции бурового снаряда для работы в среде ПМС-3 и изучением долгосрочного воздействия на подледниковые экосистемы.

Ключевые слова
Антарктида; подледниковое озеро Восток; экологически безопасное бурение; колонковый снаряд КЭМС-135; кремнийорганическая жидкость

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

Поступила: 26.04.2025 ***Принята: 05.06.2025*** ***Онлайн: 07.07.2025*** ***Опубликована: 07.07.2025***

Введение

Подледниковые озера Антарктиды представляют собой уникальные природные резервуары, сохраняющие ценную геологическую, палеоклиматическую и потенциально биологическую информацию [1-3]. Исследование данных объектов требует разработки специализированных технологий бурения, обеспечивающих минимальное воздействие на хрупкие подледниковые экосистемы [4-6].

Особый научный интерес представляет подледниковое озеро Восток – крупнейший подледный водоем Антарктиды, изолированный от внешней среды ледниковым щитом мощностью около 4000 м на протяжении миллионов лет [7-9]. С 1970 г. Санкт-Петербургский горный университет в сотрудничестве с Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ) проводит систематические исследования на станции Восток, находящейся над одноименном озером [10-12]. В результате выполненных работ пробурено пять глубоких скважин, получены километры ледяного керна, а в 2012 и 2015 годах осуществлены два успешных вскрытия озера [13, 14].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В последние годы сотрудниками Горного университета ведутся научно-исследовательские работы по созданию новых и совершенствованию существующих технологий бурения ледников, а также исследование подледниковых сред [15-17].

С 1990 г. для бурения в скважине 5Г применяется колонковый электромеханический снаряд КЭМС-135 с заливочной жидкостью (ЗЖ) на основе смеси керосина Jet A-1 и дихлорфторэтана (HCFC-141b) в качестве утяжелителя [18, 19]. Плотность такой смеси регулируется в широком диапазоне и обычно близка к плотности льда (0,92 г/см^3). Несмотря на доказанную надежность данной технологии, ее существенным недостатком является низкая экологическая безопасность используемых реагентов [20-22].

В рамках 70-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) был проведен эксперимент по замене традиционной заливочной жидкости кремнийорганической жидкостью ПМС-3, обладающей рядом преимущественных характеристик [23-25]: высокая экологическая безопасность [26]; низкая температура кристаллизации (–80 °С) [27]; отличные смазывающие свойства; химическая стабильность в широком температурном диапазоне*; биоинертность; способность абсорбировать газовые выбросы; оптимальные реологические свойства [27].

Выбор марки ПМС-3 (производитель ООО «Силан», ТУ 20.16.57-036-44216037-2023) для экспериментального бурения ствола 5Г-5 был обусловлен близостью ее плотности к плотности льда в термобарических условиях скважины и оптимальными реологическими свойствами [28, 29]. В ходе работ были исследованы температурно-плотностные характеристики жидкости в атмосферных условиях станции Восток.

Методы

Подготовка скважины 5Г к экспериментальному бурению льда включало несколько этапов:

- извлечение ЗЖ из верхних горизонтов скважины;
- комплекс геофизических исследований скважины (барометрия, термометрия, кавернометрия);
- калибровка (расширение) ствола скважины 5Г-5;
- доставка ПМС-3 на забой ствола скважины 5Г-5;
- контроль качества доставки.

Извлечение заливочной жидкости из верхних горизонтов скважины. Отбор ЗЖ из скважины проводился для понижения ее уровня с целью создания оптимального дифференциального давления системы «ледник – ЗЖ» в скважине при нахождении снаряда на забое [14].

Устройство для отбора заливочной жидкости представляет собой набор колонковых труб, в верхней части которых выполнено отверстие для забора жидкости, а на нижнем торце установлен электромагнитный клапан для ее слива. Устройство с закрытым электромагнитным клапаном опускается в скважину ниже уровня ЗЖ, которая через отверстие в верхней части заполняет внутреннюю полость колонковых труб. Затем устройство поднимается на поверхность, открывается электромагнитный клапан, и жидкость сливается в емкость. Данное устройство показало высокую надежность при многократном использовании и способность извлечения от 70 до 100 л жидкости за один рейс. Всего было выполнено пять рейсов и извлечено на поверхность 400 л ЗЖ, при этом ее уровень понизился от 51 до 70 м. Средний объем извлеченной жидкости за рейс составил 80 л.

Геофизические исследования скважины (ГИС) проводились для оценки технического состояния скважины 5Г после ее расконсервации. Такой мониторинг выполняется ежегодно минимум два раза в сезон – до начала и после окончания работ [30, 31]. Последний раз ГИС проводились в январе 2024 г. после окончания сезонных работ 69-й РАЭ.

Измерения давления и температуры осуществлялись прибором КМТ-009 (скважинный манометр-термометр), изготовленным и откалиброванным в НПП «Грант» (г. Уфа), а также протестированным в морозильной камере Лаборатории изменения климата и окружающей среды (ЛИКОС) ААНИИ. В соответствии с паспортными характеристиками разрешающая способность датчиков температуры КМТ-009 составляет 0,002 °С, а систематическая погрешность измерений не превышает ±0,1 °С [30]. Измерения проводились в процессе спуска прибора КМТ-009 от устья до забоя с шагом 100 м (10 м в призабойной зоне скважины) и выстойкой в течение одной минуты, скорость спуска 1000-3600 м/ч. На каждой точке помимо измерения давления и температуры (рис.1, *а*) проводился оперативный

* *Алексеев П.Г., Скороходов И.И., Поварнин П.И.* Свойства кремнийорганических жидкостей. М.: Энергоатомиздат, 1997. 328 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 147-158
© А.В.Большунов, С.А.Игнатьев, Д.В.Сербин, А.В.Туркеев, 2025

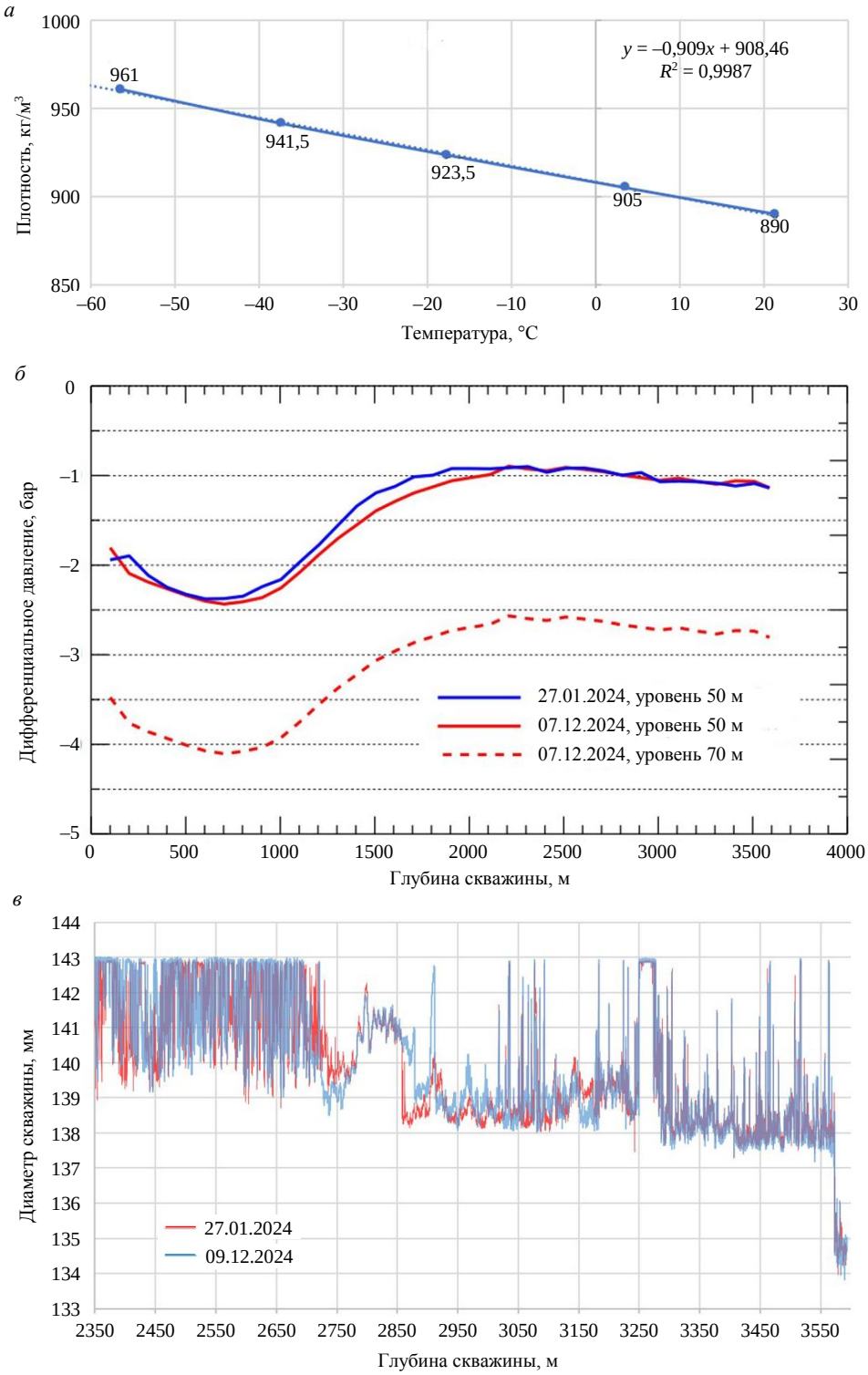


Рис.1. Данные геофизических исследований при подготовке скважины к экспериментальному бурению: *а* – зависимость плотности ПМС-3 от температуры; *б* – дифференциальное давление, приведенное к глубинам 50 и 70 м; *в* – кавернограммы ствола скважины 5Г-5 в интервале глубин 2350-3593 м

контроль динамического уровня ЗЖ при помощи эховолнометрического уровнемера с разрешающей способностью 0,01 м «Сигма-Арт» производства ООО «Технопарк-Сигма» (г. Казань). Уровень ЗЖ определялся по времени прохождения сигнала до уровня раздела фаз «воздух – жидкость» и обратно.

По результатам барометрии и термометрии с контролем уровня ЗЖ рассчитано дифференциальное давление системы «ледник – ЗЖ», приведенное к уровню 50 м (снаряд находится на

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

забое) и 70 м (снаряд находится на поверхности) в скважине 5Г. График дифференциального давления (рис.1, *б*), рассчитанного В.Я.Липенковым (ЛИКОС ААНИИ), показывает, что давление в призабойной зоне такое же, как было 21 января 2024 г. – в конце предыдущего сезона. Следовательно, поддержание уровня ЗЖ около 50 м при нахождении бурового снаряда на забое позволяет выполнять работу в скважине без риска заклинивания снаряда из-за схлопывания ее стенок. Дополнительная доставка утяжелителя дихлорфторэтана (HCFC-141b) в скважину не потребовалась.

Кавернометрия проводилась с целью выявления суженных участков скважины 5Г после годичной консервации. Диаметр скважины измерялся каверномером рычажного типа разработки Санкт-Петербургского горного университета. Сравнение кавернограмм 27.01.2024 (окончание сезона 69-й РАЭ) и 09.12.2024 (начало сезона 70-й РАЭ) (рис.1, *в*) позволило сделать вывод о том, что диаметр скважины по всей глубине за время консервации не изменился, т.е. можно было продолжить работы с предварительной калибровкой (расширением) нижнего участка ствола скважины 5Г-5, начиная с глубины 3540 м до забоя.

Калибровка (расширение) ствола скважины 5Г-5 проводится с целью устранения неровностей стенок и увеличения диаметра скважины для снижения гидравлических сопротивлений в процессе призабойной циркуляции ЗЖ и предотвращения аварийных ситуаций при бурении [32, 33].

В сезоне 70-й РАЭ калибровка проводилась двумя породоразрушающими инструментами: четырехрезцовой коронкой (рис.2, *а*) и шестирезцовым механическим расширителем МР-138 (рис.2, *б*). Четырехрезцовая коронка с внешним диаметром 138 мм ранее использовалась для забуривания дополнительного пятого ствола скважины 5Г в сезоне 64-й РАЭ (2018/19 гг.) [34], с ней выполнено два рейса в интервале 3540,0-3584,5 м с механической скоростью бурения 10-12 м/ч. Расширитель МР-138 (внешний диаметр по резцам 137,5 мм), разработанный в Санкт-Петербургском горном университете, в этом сезоне проходил скважинные испытания. Было выполнено два рейса в интервале 3584,6-3595,0 м с механической скоростью бурения 16 м/ч. После испытаний при визуальном осмотре расширителя МР-138 на поверхности зашламований резцов и промывочных окон не обнаружено.

Процесс калибровки ствола скважины коронкой и расширителем протекал стабильно, без осложнений, однако с расширителем достигнута большая механическая скорость бурения (расширения) и отмечен рост крупности шлама, приводящий к увеличению рейсовой проходки. Скважинные испытания нового расширителя МР-138 прошли успешно и позволили выявить ряд преимуществ относительно четырехрезцовой коронки. Рекомендуется его использование в дальнейших буровых работах для калибровки и расширения скважины 5Г.

Доставка ПМС-3 на забой ствола скважины 5Г-5. Целью работ являлось создание столба ПМС-3 в призабойной зоне ствола скважины 5Г-5, необходимого для проведения экспериментальных буровых работ.

Основной идеей методики доставки заливочной жидкости являлось ее пошаговое ламинарное нагнетание на забой с дискретным подъемом скважинного доставочного устройства, разработанного

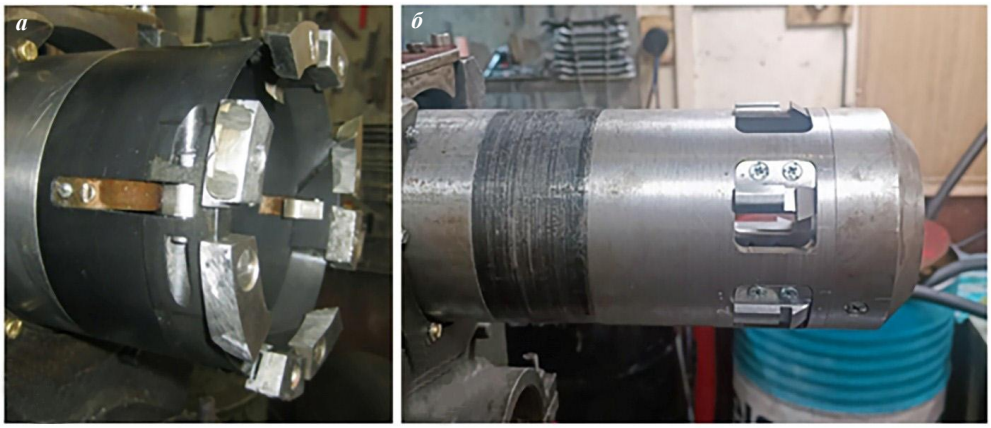


Рис.2. Технические средства для расширения скважины 5Г-5:
а – четырехрезцовая коронка; *б* – новый механический расширитель МР-138

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 147-158
© А.В.Большунов, С.А.Игнатьев, Д.В.Сербин, А.В.Туркеев, 2025

и изготовленного на станции Восток специалистами Санкт-Петербургского горного университета и ААНИИ. Устройство из-за особенностей конструкции получило название «Слоник». Устройство позволяет доставлять заданный объем жидкости в призабойную зону скважины на необходимую глубину, его конструкция включает следующие элементы: кабельный замок, электроотсек, бак для жидкости, фильтровый отсек, насосный отсек, расходомер, узел электромагнитного клапана и дозатор. Основные технические характеристики устройства «Слоник»: наружный диаметр 127 мм; длина 12,9 м; масса 210 кг; объем бака для жидкости 87 л.

На первом этапе были проведены испытания устройства на поверхности, а затем в скважине на глубинах 1250 и 3595 м. В результате испытаний (рис.3, *а*) были установлены оптимальные режимы работы устройства, в частности производительность электроцентробежного насоса ЭЦН-91, скорректирована методика доставки заливочной жидкости на забой и написана инструкция по работе с устройством.



Рис.3. Технические средства для работы с кремнийорганической жидкостью: *а* – скважинное доставочное устройство «Слоник»; *б* – многосекционный пробоотборник

Было выполнено три рейса по доставке ПМС-3 в призабойную зону ствола скважины 5Г-5. Объем доставленной ПМС-3 составил 261 л, что позволило создать столб высотой 17,46 м в интервале глубин 3577,69-3595,15 м. В процессе работы из устройства через дозатор ПМС-3 нагнеталась в призабойную зону скважины, а через отверстия в верхней части бака внутрь устройства поступала заливочная жидкость, таким образом происходило замещение заливочной жидкости на ПМС-3. После извлечения устройства на поверхность в стерильные емкости отбирались пробы ЗЖ с шагом 5 л с измерением ее плотности и температуры. Всего было отобрано 58 проб жидкости, из них 43 отправлены в Санкт-Петербургский горный университет для химического анализа.

Контроль качества доставки ПМС-3 на забой ствола скважины 5Г-5. Для анализа качества доставки ПМС-3 на забой, а также для последующего химического анализа ЗЖ необходимо было определить концентрации ПМС-3, керосина и фреона в ЗЖ в призабойной зоне ствола скважины 5Г-5.

Отбор проб ЗЖ с глубоких горизонтов скважины осуществлялся многосекционным пробоотборником (МП) с принудительно всасывающим принципом работы, разработанным проф. Н.И.Васильевым (рис. 3, *б*). Устройство, управляемое с пульта оператора, позволяет отбирать несколько проб ЗЖ объемом 400 мл на разных глубинах за один рейс. Каждая секция МП работает автономно, в используемой компоновке устройства было три секции, общая длина – 1,1 м, наружный диаметр корпуса – 127 мм.

Из-за 10-летнего пребывания МП в законсервированном состоянии перед началом работ в скважине необходимо было выполнить следующие виды проверок: полное техническое обслуживание; поверхностные стендовые испытания для проверки работоспособности МП, определения режимных параметров встроенных насосов и времени заполнения каждой секции (испытания проводились в смеси керосина Jet A-1 и утяжелителя дихлорфторэтана HCFC-141b, а также отдельно в ПМС-3); скважинные испытания на глубинах 1250 и 3590 м для определения режимных параметров и работоспособности в условиях высоких гидростатических давлений и низких температур.

В результате испытаний установлено, что из-за большой длины грузонесущего кабеля (4000 м) происходит падение напряжения постоянного тока на 91,2-91,4 %, это необходимо было учитывать при проведении скважинных работ. Также в результате испытаний был внесен ряд изменений в конструкцию: заменены обратные клапаны и часть насосов, установлена сетка по всей внутренней части корпуса МП. Мелкоячеистая сетка диаметром 0,375 мм выполняла функцию фильтрации жидкости от механических примесей.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

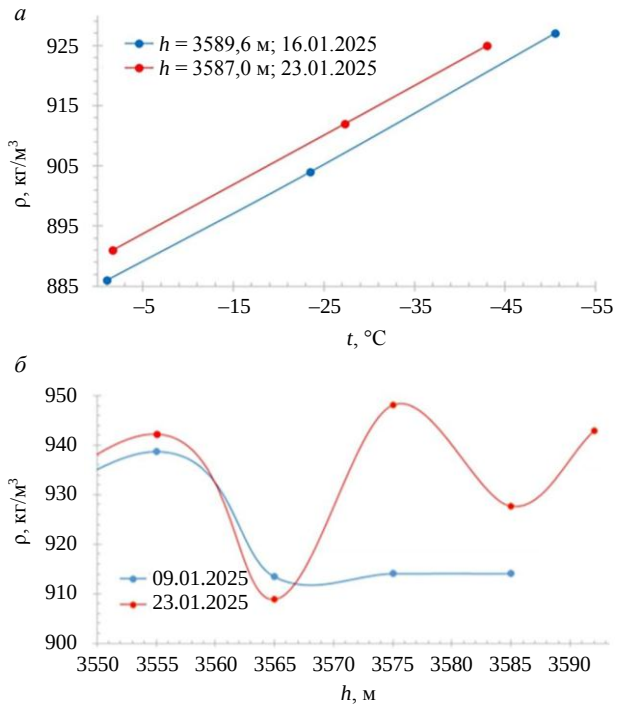


Рис.4. Результаты доставки кремнийорганической жидкости на забой: зависимость плотности проб заливочной жидкости от температуры различных глубин (*а*) и расчетная плотность ЗЖ в стволе скважины 5Г-5 по результатам барометрии (*б*) 09.01.2025 (до доставки ПМС-3) и 23.01.2025 (после доставки ПМС-3)

Было выполнено пять рейсов отбора проб ЗЖ из призабойной зоны ствола скважины 5Г-5, из них три рейса до доставки ПМС-3, один рейс после доставки ПМС-3 и один рейс после экспериментального бурения.

Пробы из МП на поверхности перемещались в стерильные емкости, далее измерялись их плотность и температура для сравнения с исходными компонентами смесей жидкостей и интерпретации термобарометрии. Всего было отобрано 15 проб.

На рис.4, *а* представлены результаты измерения плотности жидкостей в зависимости от температуры, отобранных МП 16.01.2025 с глубины 3589,6 м (до доставки ПМС-3) и 23.01.2025 с глубины 3587,0 м (после доставки ПМС-3). Каждая кривая построена по трем точкам измерений и имеет линейную зависимость. На графике можно выделить увеличение плотности ЗЖ после доставки ПМС-3 в призабойную зону ствола скважины, измеренную при атмосферном давлении (среднегодовое давление на станции Восток 460 мм рт.ст.), что свидетельствует о наличии ПМС-3 в призабойной зоне. Полученные пробы были отправлены в Санкт-Петербургский горный университет для химического анализа – определения концентраций ПМС-3, керосина Jet A-1 и дихлорфторэтана HCFC-141b, который позволит окончательно интерпретировать данные по пробоотбору.

После доставки ПМС-3 в призабойную зону скважины 5Г были измерены давление и температура. В отличие от предыдущих работ, скорость спуска и подъема на глубине 3550-3594 м составляла 40 м/ч. Такая низкая скорость была принята для предотвращения перемешивания ПМС-3 со смесью керосина Jet A-1 и утяжелителя дихлорфторэтана HCFC-141b. Результаты барометрии и термометрии ствола скважины, проведенных до доставки ПМС-3 в призабойную зону скважины (09.01.2025) и после (23.01.2025), представлены в табл.1. При наличии ряда исходных данных по давлению, температуре и уровню ЗЖ в скважине, полученных прямыми измерениями с соблюдением одинаковых условий, проводился сравнительный анализ плотностей.

По результатам барометрии была рассчитана средняя плотность жидкости в скважине на интервалах измерения по следующей формуле:

$$\rho = \frac{P_n - P_{n-1}}{g\left(\left(h_n - H_{n\,\text{ср}}\right) - \left(h_{n-1} - H_{n-1\,\text{ср}}\right)\right)} \cdot 10^5,$$

где P_n – давление ЗЖ в нижней точке n-го интервала, бар; g – ускорение свободного падения, м/с^2; h_n – глубина скважины в нижней точке n-го интервала, м; $H_{n\,\text{ср}}$ – уровень ЗЖ от устья скважины, измеренный при постановке прибора КМТ-009 в нижней точке n-го интервала и рассчитанный как средний по трем измерениям, м.

При анализе расчета плотности ЗЖ в стволе скважины 5Г-5 по результатам барометрии до и после доставки ПМС-3 в призабойную зону скважины 5Г-5 (рис.4, *б*) отмечалось заметное увеличение плотности ЗЖ с глубины 3570 м до забоя. При этом экстремум плотности (ρ = 948,09 кг/м^3) находился на отметке 3575 м (серединная точка интервала измерений), соответствующей верхней границе созданного столба ПМС-3, что позволило сделать вывод о наличии ПМС-3 в призабойной зоне ствола скважины 5Г-5 и, следовательно, об успешной реализации технологии и технического средства доставки ПМС-3.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 147-158
© А.В.Большунов, С.А.Игнатьев, Д.В.Сербин, А.В.Туркеев, 2025

Таблица 1

Результаты барометрии и термометрии ствола скважины 5Г-5 до и после доставки ПМС-3 в призабойную зону

№ п/п	h, м	P_1, бар	t, °С	$H_{ср}$, м	$h_{ср}$, м	ρ, кг/м^3
	09.01.2025					
1	3400	304,58	–10,75	48,68		
2	3500	313,68	–8,68	48,06	3450	921,91
3	3550	318,20	–7,63	47,61	3525	913,23
4	3560	319,12	–7,39	47,62	3555	938,76
5	3570	320,02	–7,21	47,57	3565	913,47
6	3580	320,92	–6,99	47,54	3575	914,08
7	3590	321,82	–6,79	47,50	3585	914,08
	23.01.2025					
1	3400	305,06	–10,76	43,29		
2	3500	314,16	–8,71	42,62	3450	921,45
3	3550	318,68	–7,64	42,10	3525	911,90
4	3560	319,60	–7,45	42,14	3555	942,22
5	3570	320,48	–7,19	42,27	3565	908,86
6	3580	321,38	–6,93	42,60	3575	948,09
7	3590	322,28	–6,77	42,71	3585	927,64
8	3594	322,65	–6,64	42,71	3592	942,92

Обсуждение результатов

Целью экспериментального бурения ствола скважины 5Г-5 колонковым электромеханическим буровым снарядом КЭМС-135 на грузонесущем кабеле в среде кремнийорганической жидкости являлось определение оптимальных режимов бурения, выявление особенностей бурения теплого конжеляционного льда и очистки забоя от шлама. Стандартный колонковый электромеханический буровой снаряд КЭМС-135 общей длиной 12,4 м укомплектован тремя шламовыми трубами (4,95 м) с тремя фильтрами и двумя колонковыми трубами (КТ) (3,3 м).

Перед экспериментальным бурением были проведены полное техническое обслуживание бурового снаряда и ремонт датчиков комплекса телеметрии – осевой нагрузки, проворота и измерения мощности (тока), а также измерена производительность роторного насоса, установленного в буровом снаряде, при прокачке ПМС-3 при температуре жидкости –2 °С и плотности 903 кг/м^3, которая составила 94 л/мин. Было выполнено два рейса колонкового бурения ствола скважины 5Г-5 с использованием КЭМС-135 в среде ПМС-3: № 22 (25.01.2025) и № 23 (26.01.2025).

При спуске бурового снаряда проводилась специальная доходка для предотвращения перемешивания заливочных жидкостей и обеспечения заполнения внутреннего пространства КТ и шламосборного отсека жидкостью ПМС-3. В интервале 3570-3580 м спуск осуществлялся со скоростью 30 м/ч. С учетом производительности роторного насоса и внутреннего диаметра колонковых труб была определена рациональная скорость спуска КЭМС-135 с включенным насосом в интервале 3580-3595 м, которая составила 500 м/ч. При данной скорости спуска скорость жидкости, которая всасывается насосом и проходит через КТ и шламосборный отсек бурового снаряда, относительно стенок скважины равна нулю. Буровой снаряд замещает собственный вытесненный объем с учетом прокачки, ЗЖ заполняет все его внутренние полости, и снаряд проходит через ЗЖ без ее перемешивания. Далее выполнялась стандартная доходка с вращением КТ и включенным насосом, спуск до забоя осуществлялся со скоростью 8 м/ч.

При постановке на забой ток на приводном электродвигателе (ПЭД) бурового снаряда резко возрастал, подача снаряда останавливалась до стабилизации токовой нагрузки (рис.5, *а*). После стабилизации тока начиналось бурение скважины с минимально возможной механической скоростью бурения и плавным ее увеличением до 2,1 м/ч.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

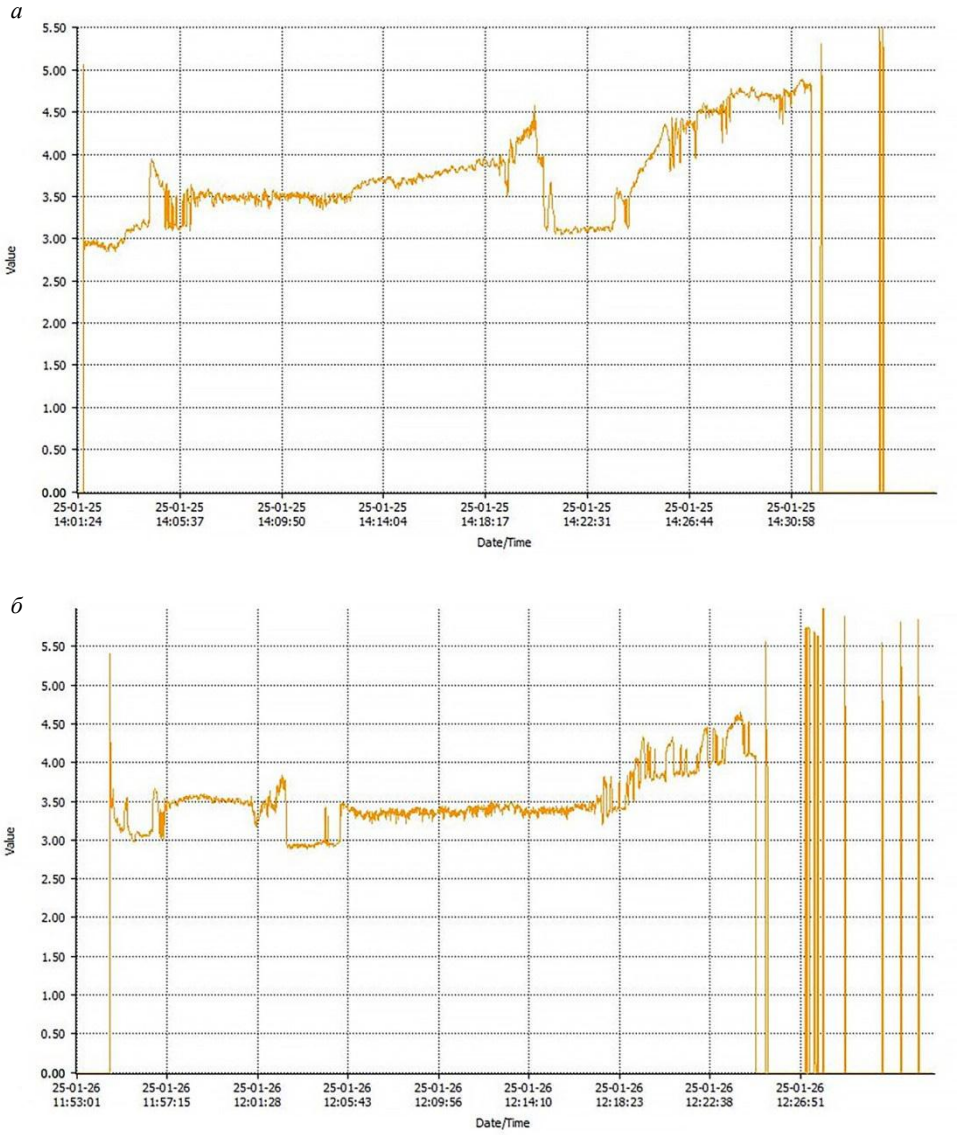


Рис.5. Токовая нагрузка на двигатель снаряда при бурении:
а – рейс № 22; *б* – рейс № 23

Забой рейса № 22 находился на отметке 3595,15 м, после проходки 0,35 м механическую скорость бурения увеличили до 3 м/ч, процесс бурения протекал стабильно. Однако было отмечено плавное постоянное повышение тока ПЭД, что характерно для заполнения фильтров шламом, но с большей интенсивностью, чем обычно. После проходки 0,7 м ток ПЭД достиг более 4 А. При проходке 0,9 м на глубине 3596,05 м буровой снаряд начал проворачиваться, его подача была мгновенно остановлена. После трех минут простоя без подачи проворот бурового снаряда полностью прекратился, и бурение продолжилось с механической скоростью 2,1 м/ч. После проходки 0,05 м механическую скорость уменьшили до 1,1 м/ч, при этом ток ПЭД не стабилизировался и постоянно возрастал, на глубине 3596,35 м бурение остановили. Характер возрастания тока ПЭД без возвращения к оптимальным режимам сигнализировал о полной забивке фильтровой системы шламом.

Бурение льда (рейс № 23) началось с минимально возможной скоростью бурения и плавным увеличением до 2,5, затем 3 м/ч. После проходки 0,3 м произошел проворот бурового снаряда на забое, которому предшествовало явное увеличение токовой нагрузки (рис.5, *б*). Подача бурового снаряда мгновенно была остановлена, после трех минут проворот прекратился, и бурение продолжилось со скоростью 2,1 м/ч. Процесс бурения был стабильный – после проходки 0,95 м отмечен рваный график токовой нагрузки, при этом скорость бурения была снижена до 1,7 м/ч. Бурение остановлено после интенсивного возрастания тока ПЭД на глубине 3597,5 м.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 147-158
© А.В.Большунов, С.А.Игнатьев, Д.В.Сербин, А.В.Туркеев, 2025

Процесс отрыва керна при бурении в среде ПМС-3 аналогичен отрыву при бурении в керосине с фреоном. В рейсе № 22 керн оторвался с первого раза, а в рейсе № 23 – с третьего, при этом во втором случае отрыв был неявным, также было отмечено повышенное натяжение грузонесущего кабеля, что характеризуется увеличением значения тока лебедки до 80А.

Подъем бурового снаряда с забоя до глубины 3570 м осуществлялся со скоростью 50 м/ч для предотвращения перемешивания заливочных жидкостей, далее – при максимальных возможных скоростях.

Данные, полученные во время рейсов экспериментального бурения КЭМС-135 в среде ПМС-3, представлены в табл.2.

Таблица 2

Результаты экспериментального бурения КЭМС-135 в среде ПМС-3

Параметры	Номер рейса	
	22	23
Проходка, м	1,2	1,1
Время бурения, мин	25	26
Средняя механическая скорость бурения, м/ч	2,88	2,54
Максимальная механическая скорость бурения, м/ч	3,00	3,00
Длина керна, м	1,10	1,14
Продолжительность рейса, чч:мм	05:05	04:54

После обоих рейсов при извлечении керна из колонковой трубы (рис.6, *а*) были обнаружены шламовые пробки над керном: длиной 0,215 м и диаметром 0,112 м (рис.6, *б*) (рейс № 22), длиной 0,15 м и диаметром 0,107-0,109 м (рис.6, *в*) (рейс № 23). Керн, полученный в рейсе № 23, имеет борозды от кернорвательных ножей (рис.6, *в*), что случается при отрыве керна не с первого раза. Зашламования коронки и кернорвательных ножей после бурения не замечено. Характер истечения ЗЖ из шламосборного отсека в ходе обслуживания КЭМС-135 изменился. Наблюдались тонкие струйки ЗЖ по периметру трубы (рис.6, *г*), а шламосборный отсек был полностью заполнен ЗЖ.

В процессе разборки фильтровой системы была обнаружена полная забивка шламом обратного клапана фильтровой системы (рис.6, *д*), который остался открытым в процессе подъема бурового снаряда из скважины. Такая ситуация наблюдалась после обоих рейсов.

Забивка фильтров шламом после рейса № 22 следующая: верхний фильтр – 100, средний фильтр – 70, нижний фильтр – 50 %. Нижний фильтр после рейса оказался очень грязным (рис.6, *е*), на наружной стороне сетки обнаружены механические примеси, что характеризует интенсивно загрязненную призабойную зону скважины. Забивка фильтров шламом после рейса № 23 следующая: верхний фильтр – 80, средний фильтр – 70, нижний фильтр – 70 %.

В ходе обслуживания бурового снаряда были отобраны по две пробы ЗЖ из фильтровой системы и по шесть проб шлама с каждого рейса (рис.6, *ж*). Визуально отмечается увеличение крупности шлама по сравнению с бурением на керосине с фреоном. Все пробы отправлены в Санкт-Петербургский горный университет для дальнейших лабораторных исследований.

В ходе технического обслуживания бурового снаряда после двух рейсов в среде кремнийорганической жидкости было установлено, что элементы привода (зубчатые колеса и подшипники) покрыты тонкой пленкой ПМС-3 (обладающей смазывающей способностью), что положительно влияет на механическую работу бурового снаряда.

Анализ двух рейсов колонкового бурения скважины с использованием КЭМС-135 в среде кремнийорганической жидкости (ПМС-3) показал следующее: возрастание механической скорости бурения до 3 м/ч; увеличение крупности шлама; отсутствие зашламования коронки и кернорвательных ножей; отсутствие слипания шлама; стабильное протекание процесса бурения; положительное влияние смазывающих способностей жидкости на элементы привода снаряда.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

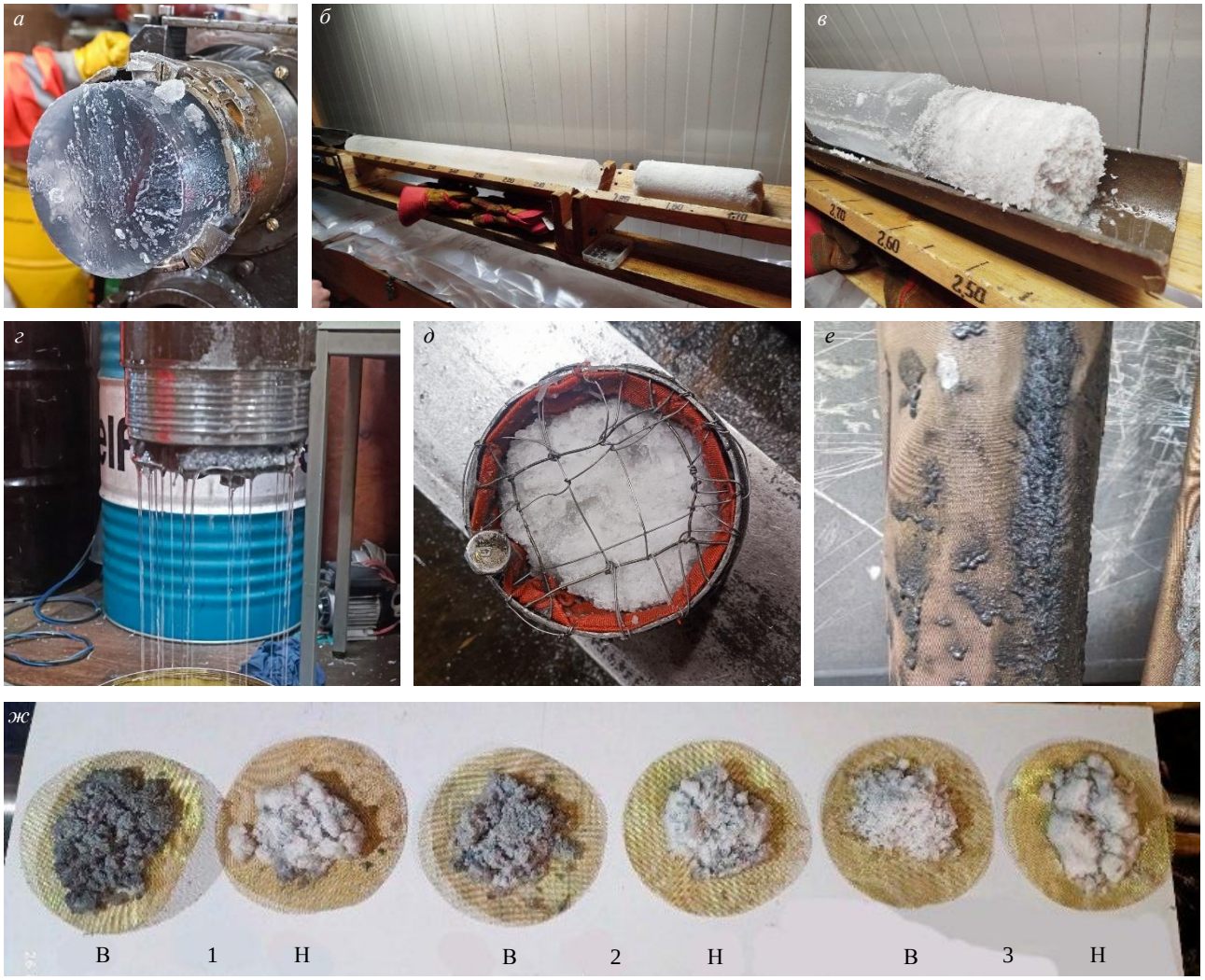


Рис.6. Результаты экспериментального бурения: керн в колонковой трубе после извлечения бурового снаряда из скважины (*а*); керн и шламовая пробка рейса № 22 (*б*); рейса № 23 (*в*); истечение ЗЖ из шламосборного отсека в ходе разборки бурового снаряда после рейса № 22 (*г*); забитый шламом обратный клапан (*д*); нижний фильтр после рейса № 22 (*е*); пробы шлама (*ж*)

Заключение

Экспериментальное бурение льда в скважине 5Г (станция Восток, Антарктида) с применением кремнийорганической жидкости (ПМС-3) в качестве заливочной среды позволили получить значимые результаты, подтверждающие перспективность данной технологии для глубокого бурения в ледниках. По результатам работ можно сформулировать следующие основные выводы.

Эффективность применения. Использование ПМС-3 продемонстрировало ряд преимуществ по сравнению с традиционной смесью керосина Jet A-1 и дихлорфторэтана HCFC-141b: повышение механической скорости бурения до 3 м/ч; увеличение рейсовой проходки; улучшение смазывающих свойств, что положительно сказалось на работе элементов привода бурового снаряда КЭМС-135; отсутствие зашламования коронки и кернорвательных ножей, а также слипания шлама, что свидетельствует о стабильности процесса бурения.

Экологическая безопасность. ПМС-3 обладает высокой биоинертностью и низкой токсичностью, что делает ее экологически предпочтительной для работ в уникальных природных условиях Антарктиды. Это особенно важно для проектов, связанных с исследованием подледниковых озер, где минимизация загрязнения окружающей среды является критически важной задачей.

Технологические аспекты. Успешная доставка ПМС-3 на забой скважины с использованием устройства «Слоник» подтвердила возможность создания стабильного столба жидкости в призабойной зоне. Контроль качества доставки, включая отбор проб многосекционным пробоотборником

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 147-158
© А.В.Большунов, С.А.Игнатьев, Д.В.Сербин, А.В.Туркеев, 2025

и проведение барометрии, показал высокую точность и надежность методики. Калибровка ствола скважины с применением расширителя МР-138 позволила увеличить рейсовую проходку и снизить гидравлические сопротивления.

Выявленные особенности. Наблюдалось увеличение крупности шлама, что требует дальнейшего изучения для оптимизации работы фильтровых систем бурового снаряда. Интенсивное зашламование фильтров и обратного клапана указывает на необходимость модернизации конструкции снаряда для работы в среде ПМС-3.

Перспективы дальнейших исследований: разработка модернизированного бурового снаряда, адаптированного для работы с ПМС-3, с улучшенной системой шламоудаления; углубленное изучение взаимодействия ПМС-3 с различными типами льда, включая базальный и конжеляционный; проведение дополнительных экспериментов для оптимизации режимов бурения и оценки долгосрочной стабильности ПМС-3 в условиях высоких давлений и низких температур.

Результаты экспериментального бурения подтвердили, что ПМС-3 является перспективной альтернативой традиционным заливочным жидкостям, применение которой не только повышает эффективность буровых работ, но и соответствует современным экологическим стандартам. Для внедрения данной технологии в практику глубокого бурения рекомендуется провести дополнительные исследования жидкостей в различных термобарических условиях, разработать методические руководства по использованию ПМС-3 и обеспечить мониторинг химического состава жидкости в процессе длительной эксплуатации.

Проведенные работы открывают новые возможности для реализации проектов по исследованию подледниковых озер и других уникальных природных объектов Антарктиды с минимальным воздействием на окружающую среду.

Авторы выражают благодарность сотрудникам 70-й Российской антарктической экспедиции за помощь в организации и проведении научно-исследовательских работ на станции Восток.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Siegert M.J., Priscu J.C., Alekhina I.A. et al.* Antarctic subglacial lake exploration: first results and future plans // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2016. Vol. 374. Iss. 2059. DOI: 10.1098/rsta.2014.0466
2. *Livingstone S.J., Yan Li, Rutishauser A. et al.* Subglacial lakes and their changing role in a warming climate // Nature Reviews Earth & Environment. 2022. Vol. 3. Iss. 2. P. 106-124. DOI: 10.1038/s43017-021-00246-9
3. *Smith A.M., Woodward J., Ross N. et al.* Evidence for the long-term sedimentary environment in an Antarctic subglacial lake // Earth and Planetary Science Letters. 2018. Vol. 504. P. 139-151. DOI: 10.1016/j.epsl.2018.10.011
4. *Priscu J.C., Kalin J., Winans J. et al.* Scientific access into Mercer Subglacial Lake: scientific objectives, drilling operations and initial observations // Annals of Glaciology. 2021. Vol. 62. Iss. 85-86. P. 340-352. DOI: 10.1017/aog.2021.10
5. *Yan Zhou, Xiangbin Cui, Zhenxue Dai et al.* The Antarctic Subglacial Hydrological Environment and International Drilling Projects: A Review // Water. 2024. Vol. 16. Iss. 8. № 1111. DOI: 10.3390/w16081111
6. *Талалай П.Г., Фан Х.* Альтернативные решения экологически чистого вскрытия подледникового озера Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. Т. 70. № 4. С. 499-513 (in English). DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-4-499-513
7. *Kapitsa A.P., Ridley J.K., Robin G. de Q. et al.* A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica // Nature. 1996. Vol. 381. Iss. 6584. P. 684-686. DOI: 10.1038/381684a0
8. *Попов С.В., Боронина А.С., Екайкин А.А. и др.* Дистанционные исследования и математическое моделирование озера Восток, Восточная Антарктида: прошлое, настоящее и будущее // Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. Т. 70. № 4. С. 460-476 (in English). DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-4-460-476
9. *Лукин В.В., Марков А.Н.* Гипотеза тектонического доледникового генезиса котловины и водного тела антарктического озера Восток // География и природные ресурсы. 2024. Т. 45. № 2. С. 153-164. DOI: 10.15372/GIPR20240216
10. *Lukin V., Bulat S.* Vostok Subglacial Lake: Details of Russian Plans/Activities for Drilling and Sampling // Antarctic Subglacial Aquatic Environments. American Geophysical Union, 2011. Vol. 192. P. 187-197. DOI: 10.1002/9781118670354.ch11
11. *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
12. *Горелик Г.Д., Егоров А.С., Шуклин И.А., Ушаков Д.Е.* Обоснование оптимального комплекса геофизических исследований глубинного строения района озера Восток // Горный журнал. 2024. № 9. С. 56-61. DOI: 10.17580/gzh.2024.09.09
13. *Vasiliev N.I., Talalay P.G., Bobin N.E. et al.* Deep drilling at Vostok station, Antarctica: history and recent events // Annals of Glaciology. 2007. Vol. 47. P. 10-23. DOI: 10.3189/172756407786857776
14. *Липенков В.Я., Туркеев А.В., Екайкин А.А. и др.* Вскрытие подледникового озера Восток: уроки и выводы для будущих полномасштабных исследований // Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. Т. 70. № 4. С. 477-498 (in English). DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-4-477-498
15. *Большунов А.В., Васильев Н.И., Тимофеев И.П. и др.* Перспективное технологическое решение по отбору проб донных отложений подледникового озера Восток: актуальность и постановка задач исследований // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 779-787. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.1

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

16. *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
17. *Шишкин Е.В., Большунов А.В., Тимофеев И.П. и др.* Модель шагающего пробоотборника для исследования донной поверхности подледникового озера Восток // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 853-864. DOI: 10.31897/PMI.2022.53
18. *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.
19. *Talalay P.G.* Mechanical Ice Drilling Technology. Springer, 2016. 284 p. DOI: 10.1007/978-981-10-0560-2
20. *Алехина И.А., Москвин А.Л., Екайкин А.А., Липенков В.Я.* Фенольные соединения в скважине 5Г на станции Восток после вскрытия подледникового озера // Лед и Снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 417-426. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-3-417-426
21. *Липенков В.Я., Екайкин А.А., Алехина И.А. и др.* Эволюция климата, оледенения и подледниковой среды Антарктиды по данным исследований ледяных кернов и проб воды озера Восток (Основные итоги работ по проекту РНФ, 2014-2016 гг.) // Лед и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 133-141. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-1-133-141
22. *Алехина И.А., Васильев Н.И., Екайкин А.А., Липенков В.Я.* Предварительные результаты исследований химического состава воды, замерзшей в буровой скважине после вскрытия озера Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 2 (100). С. 5-14.
23. *Triest J., Alemany O.* Drill fluid selection for the SUBGLACIOR probe: a review of silicone oil as a drill fluid // Annals of Glaciology. 2014. Vol. 55. Iss. 68. P. 311-321. DOI: 10.3189/2014AoG68A028
24. *Alemany O., Talalay P., Boissonneau P. et al.* The SUBGLACIOR drilling probe: hydraulic considerations // Annals of Glaciology. 2021. Vol. 62. Iss. 84. P. 131-142. DOI: 10.1017/aog.2020.79
25. *Litvinenko V., Trushko V.* Modelling of geomechanical processes of interaction of the ice cover with subglacial Lake Vostok in Antarctica // Antarctic Science. 2025. Vol. 37. Iss. 1. P. 39-48. DOI: 10.1017/S0954102024000506
26. *Talalay P.G., Hong J.* Perspectives for development of ice drilling technology: continuation of the discussion // Annals of Glaciology. 2021. Vol. 62. Iss. 84. P. 143-156. DOI: 10.1017/aog.2020.81
27. *Ning Liu, Huiwen Xu, Yang Yang et al.* Physicochemical properties of potential low-temperature drilling fluids for deep ice core drilling // Cold Regions Science and Technology. 2016. Vol. 129. P. 45-50. DOI: 10.1016/j.coldregions.2016.06.004
28. *Talalay P., Cheng Yang, Pinlu Cao et al.* Ice-core drilling problems and solutions // Cold Regions Science and Technology. 2015. Vol. 120. P. 1-20. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.08.014
29. *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
30. *Липенков В.Я., Туркеев А.В., Васильев Н.И. и др.* Температура плавления льда и газосодержание воды на контакте ледника с подледниковым озером Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 4. С. 348-367. DOI: 10.30758/0555-2648-2021-67-4-348-367
31. *Markov A., Talalay P., Sysoev M. et al.* Borehole multi-functional logger for geophysical high-precision monitoring in Antarctic and Greenland ice sheets and glaciers // Annals of Glaciology. 2021. Vol. 62. Iss. 85-86. P. 374-384. DOI: 10.1017/aog.2021.17
32. *Motoyama H., Takahashi A., Tanaka Y. et al.* Deep ice core drilling to a depth of 3035.22 m at Dome Fuji, Antarctica in 2001–07 // Annals of Glaciology. 2021. Vol. 62. Iss. 85-86. P. 212-222. DOI: 10.1017/aog.2020.84
33. *Kern Z., Perşoiu A.* A Review of Ice Core Drilling in Cave Environment – Challenges, Achievements and Future Directions // Frontiers in Earth Science. 2022. Vol. 9. № 720038. DOI: 10.3389/feart.2021.720038
34. *Turkeev A.V., Vasilev N.I., Lipenkov V.Ya. et al.* Drilling the new 5G-5 branch hole at Vostok Station for collecting a replicate core of old meteoric ice // Annals of Glaciology. 2021. Vol. 62. Iss. 85-86. P. 305-310. DOI: 10.1017/aog.2021.4

***Авторы*: Алексей Викторович Большунов,** *канд. техн. наук, научный руководитель лаборатории, Bolshunov_AV@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0002-3879-7380* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Сергей Анатольевич Игнатьев,** *канд. техн. наук, заведующий кафедрой, https://orcid.org/0000-0002-5527-0978* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Данил Васильевич Сербин,** *канд. техн. наук, ассистент, https://orcid.org/0000-0002-9855-7178* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Алексей Викторович Туркеев,** *научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-9453-4059* (*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0