

УДК 550.822.7

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕНОСА ЛЕДЯНОГО ШЛАМА ВОЗДУХОМ ПРИ БУРЕНИИ СНЕЖНО-ФИРНОВОЙ ТОЛЩИ

© 2023 г. С. А. Игнатьев<sup>1</sup>, Д. А. Васильев<sup>1,\*</sup>, А. В. Большунов<sup>1</sup>,  
М. А. Васильева<sup>1</sup>, А. Ю. Ожигин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: Vasilev\_DA@pers.spmi.ru

Поступила в редакцию 10.08.2022 г.

После доработки 03.10.2022 г.

Принята к публикации 06.03.2023 г.

В целях разработки технологии бурения снежно-фирновой толщи с обратной призабойной циркуляцией воздуха на станции Восток проведены экспериментальные исследования. Установлена динамика изменения характеристик ледяного шлама, таких как: фракционный состав, насыпная плотность, форма и скорость витания в зависимости от параметров снежно-фирнового горизонта, в том числе от распределения плотности массива по глубине.

**Ключевые слова:** Центральная Антарктида, бурение с воздухом, ледяной шлам, критическая скорость, скорость витания, керн, снег, фирн

DOI: 10.31857/S2076673423010076, EDN: MABFEO

### ВВЕДЕНИЕ

Центральная часть Восточно-Антарктического ледникового щита, на протяжении многих сотен километров, представляет собой высокогорное плато. Снегонакопление в этой части Антарктиды происходит за счёт выпадения твёрдых осадков антициклонического типа — ледяных игл. Вследствие холодного или сухого (Шумский, 1955; Калесник, 1963), метаморфизма снега, путём уплотнения и рекристаллизации, превращается сначала в фирн, а затем в лёд. Основным критерием превращения фирна в лёд считается схлопывание воздушных пор между отдельными кристаллами льда (Липенков, Саламатин, 2014). В Центральной Антарктиде, в том числе в районе станции Восток, продолжительность данного процесса составляет более 2000 лет, а граница снежно-фирновой толщи находится на глубине около 100 м (Cuffey, Paterson, 2010; Липенков, 2018; Верес и др., 2020).

Комплексное изучение ледникового покрова Антарктиды, а также подледниковой материковой платформы невозможно без бурения снежно-фирнового горизонта. Бурение верхних слоёв антарктического ледника проводится в целях геофизических, сейсмических, гляциологических, микробиологических и других видов исследований. Одно из перспективных направлений в области бурения снежно-фирновых горизонтов

ледников — разработка технологии бурения снарядами на грузонесущем кабеле с обратной призабойной циркуляцией воздуха. Бурение снарядами с такой схемой циркуляции воздуха впервые опробовано на куполе ледника Академии наук (архипелаг Северная Земля) учёными Санкт-Петербургского горного университета совместно с исследователями из института имени Альфреда Вегенера (Саватюгин и др., 2001; Fritzsche et al., 2002). Несмотря на то, что в ходе бурения снежно-фирновая толща была успешно пройдена с полным отбором керна, учёные столкнулись со значительным количеством осложнений, вызванных, в большинстве случаев, обильным водопритоканом в скважину. Предполагается, что при успешном внедрении данной технологии во внутриконтинентальных условиях Антарктиды и Гренландии, где таяние ледника практически не происходит, существенно повысится производительность, энергоэффективность и безаварийность бурения (Gendler, Prokhorova, 2021) по сравнению с применяемыми в настоящее время методами шнекового и теплового колонкового бурения. Помимо вышеперечисленного, применение воздуха в качестве очистного агента существенно снижает негативное влияние буровых работ на окружающую среду. Это объясняется практически полным отсутствием теплового загрязнения, которое считается неотъемлемым фактором при бурении тепловыми снарядами, а также химического

загрязнения, как при бурении с применением заливочных жидкостей, состоящих из токсичных смесей жидких углеводородов (Islamov et al., 2019; Sultanbekov et al., 2021). Описание предлагаемой технологии, её теоретических аспектов и сфер применения подробно разобрано в предыдущих публикациях (Hu et al., 2019; Большунов и др., 2022).

Исследователи из Китая изучили режимы течения воздуха внутри бурового снаряда на основе расчётных формул и моделирования методом конечных элементов программной среды Fluent 15. Полученные теоретические результаты проверены в ходе проведения экспериментальных буровых работ на стендовом оборудовании (Wang et al., 2018), с применением различных видов крыльчаток компрессора (Hu et al., 2019). Результаты проведённых научно-исследовательских работ позволили сделать вывод, что предложенная конструкция бурового снаряда пригодна для бурения, при этом скорость потока воздуха для эффективного транспортирования ледяного шлама должна быть не менее 7.7 м/с.

Данные, полученные в ходе исследования, представляют значительный интерес для учёных, занимающихся вопросом бурения ледников с очисткой забоя воздухом. Однако то, что значение необходимой скорости воздушного потока получено на основании эмпирических выражений для стандартных условий окружающей среды, не позволяет в полной мере утверждать о его достоверности и универсальности представленной методологии определения параметров бурения. Как известно, применение эмпирических формул в условиях, отличных от тех, для которых они были определены, дает значительное расхождение вычислений с фактическими значениями. Отдельно необходимо отметить, что бурение проводилось на образцах искусственно замороженного льда, физические свойства которого в значительной мере отличаются от реального снежно-фирнового горизонта Центральной Антарктиды (Whelsky, Albert, 2016; Gibson et al., 2020).

Наибольшая достоверность расчёта требуемой скорости восходящего потока воздуха при бурении с продувкой достигается тогда, когда в его основу положены экспериментально подтвержденные значения скорости витания буримого шлама. Скорость воздушного потока в вертикальном канале, при которой частица находится в установившемся взвешенном состоянии, называется скоростью витания. В тот момент, когда скорость восходящего потока превышает скорость витания частицы, она начинает свое движение по каналу. Таким образом, зная скорость витания частиц бурового шлама, можно найти требуемую скорость восходящего потока для эффективного бурения.

Данные значения скорости витания для ледяного шлама снежно-фирновой толщи Центральной Антарктиды возможно получить только в ходе натурного эксперимента, с учётом особенностей условий окружающей среды высокогорного антарктического плато (Большунов и др., 2022).

Принимая во внимание вышеизложенное, сотрудниками Санкт-Петербургского горного университета разработана методика проведения экспериментальных исследований по изучению процесса транспортирования ледяного шлама при бурении с очисткой забоя воздухом, которые успешно проведены в период 67-й РАЭ в условиях станции Восток.

## ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основной целью выполнения исследования — получение недостающих экспериментальных данных для обоснования и разработки технологии бурения снежно-фирнового горизонта снарядами на грузонесущем кабеле с обратной призабойной циркуляцией воздуха.

Для достижения заявленной цели в сезоне 67 РАЭ поставлены следующие задачи: уточнение плотности снежно-фирновой толщи вблизи станции Восток; определение фракционного состава и насыпной плотности ледяного шлама снежно-фирновой толщи; поиск значения скорости витания для частиц бурового шлама различной крупности и формы; установление формы частиц ледяного шлама и зависимость её изменения с глубиной.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

**Отбор образцов керна и ледяного шлама.** В рамках подготовки к проведению экспериментальных исследований проведено бурение неглубокой скважины VK-22, из которой получены кернавый материал и ледяной шлам. Буровые работы велись на площадке бурения, расположенной на расстоянии 700 м от станции Восток (78°27'51" ю.ш., 106°50'14" в.д., высота над ур. моря 3460 м) (Litvinenko et al., 2020). Удаленность площадки бурения от станции обусловлена необходимостью исключить в точке бурения влияние техногенного снегонакопления, обусловленное близостью сооружений станции или другими искусственными объектами.

Бурение велось посредством мобильной буровой установки «бур Пурше» (рис. 1, а), состоящей из: мачты с кронблоком; лебедки с грузонесущим кабелем; пульта управления и шнекового бурового снаряда. Питание установки осуществлялось от бензиновой переносной электростанции (5 кВт, 10А). Буровая бригада состояла из трёх человек: оператора, ведущего бурение, и двух буро-



**Рис. 1.** Экспериментальные работы на станции Восток в сезоне 67 РАЭ: *а* – буровая площадка скважины VK-22 ситовой анализ: 1 – лебедка и её электропривод в сборе; 2 – буровая мачта с кронблоком; 3 – устье скважины; 4 – буровой снаряд; *б* – ледяной шлам с различных интервалов бурения; *в* – ледяной шлам, рассеянный на лабораторных ситах.

**Fig. 1.** Experimental research at Vostok station in the season of the 67th RAE: *a* – drill site of VK-22 borehole: 1 – winch and its electric drive assembly; 2 – drilling mast with crown block; 3 – wellhead; 4 – drilling projectile; *б* – ice cuttings from different drilling intervals; *в* – ice cuttings scattered on laboratory sieves.

виков, занимающихся обслуживанием снаряда, извлечением керна из колонковой трубы и сбором шлама.

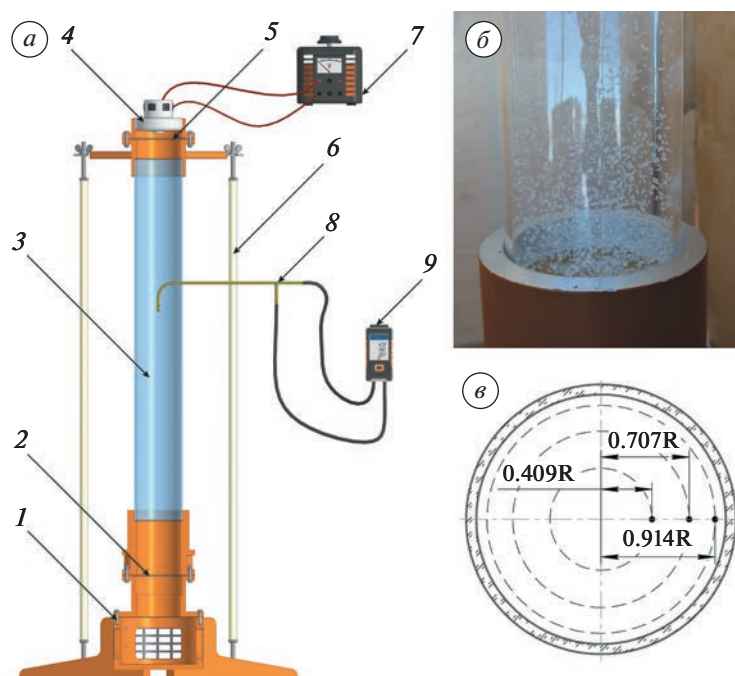
По завершении каждого рейса отбирались снежно-фирновые керны и образцы ледяного шлама. Керны и шлам упаковывались в отдельные пластиковые рукава и подписывались согласно номеру рейса и интервалу бурения (рис. 1, б). Отобранные образцы доставлены в гляциологическую лабораторию бурового комплекса скважины 5Г, где они отсортированы и оставлены на хранение при средней температуре  $-53^{\circ}\text{C}$  и среднем атмосферном давлении 471.8 мм рт. ст.

**Гранулометрический анализ ледяного шлама.** Чтобы определить, в каких соотношениях по крупности распределяются частицы шлама, действовался метод ситового анализа (Hong et al., 2015). Для этого применялся набор лабораторных сит (ГОСТ Р 51568-99) с крупностью ячеек: 1.6; 1.25; 1; 0.8; 0.63; 0.4 и 0.25 мм (рис. 1, в). Для каж-

дого рейса фракционный состав шлама определялся по трем независимым пробам массой 200 г каждая, которые поочередно рассеивались на ситах, по результатам рассеивов выводилось среднее значение для интервала.

**Определение формы частиц ледяного шлама.** Для фиксирования формы ледяных частиц сделан ряд макроснимков различных фракций шлама с разных, по глубине залегания, горизонтов скважины. Фракцию шлама определенного размера помещали на предметное стекло, над ним располагали два поляризованных фильтра для повышения контрастности каждой отдельной частицы и проводили фотографирование для дальнейшего анализа.

**Определение плотности снежно-фирновой толщи и насыпной плотности шлама.** Плотность снежно-фирновой толщи в районе бурения определяли по кернам, путем сопоставления их массы с объемом. Первые 5 метров керна были слишком



**Рис. 2.** Экспериментальный стенд по исследованию процесса транспортирования ледяного шлама. *а* – 3D-модель экспериментального стенда: 1 – разборное основание стенда; 2 – сетка для шлама; 3 – прозрачная труба витания; 4 – мотор-турбина; 5 – фильтр; 6 – шпильки; 7 – автотрансформатор; 8 – трубка Пито–Прандтля; 9 – электронный дифференциальный микроманометр testo440 dP; *б* – уравновешенное состояние витания ледяного шлама; *в* – схема замера скорости воздуха в трубе витания, где  $R$  – внутренний радиус прозрачной трубы витания.

**Fig. 2.** Experimental facility for study ice cuttings transportation process. *a* – 3D model of the experimental facility: 1 – demountable testing facility base; 2 – ice cuttings grid; 3 – transparent critical velocity tube; 4 – turbine motor; 5 – filter; 6 – double-end bolt; 7 – autotransformer; 8 – Pitot–Prandtl tube; 9 – electrical differential micromanometer testo 440 dP; *б* – equilibrium state of ice cuttings soaring; *в* – the scheme of measuring the air velocity in the critical velocity tube, where  $R$  is inner radius of the transparent critical velocity tube.

хрупкими и фрагментированными, что не позволяло достоверно определить их плотность. Данные о плотности верхнего снежного горизонта взяты из ранее опубликованных работ научных сотрудников Лаборатории изменения климата окружающей среды (ЛИКОС) (Екайкин и др., 2020).

Насыпную плотность ледяного шлама измеряли по методике определения плотности сыпучих материалов. На штативе закрепляли стеклянную воронку, под ней устанавливали тару известного объёма (лабораторный стакан). При засыпке ледяного шлама в воронку он под собственным весом ссыпается в тару; с верхушки заполненной тары удаляются излишки (горка), после чего измеряют массу полного стакана. Таким образом, зная объём тары и массу шлама в ней, определялось значение насыпной плотности. Для каждого рейса среднее значение насыпной плотности шлама принималось по результатам трёх независимых измерений.

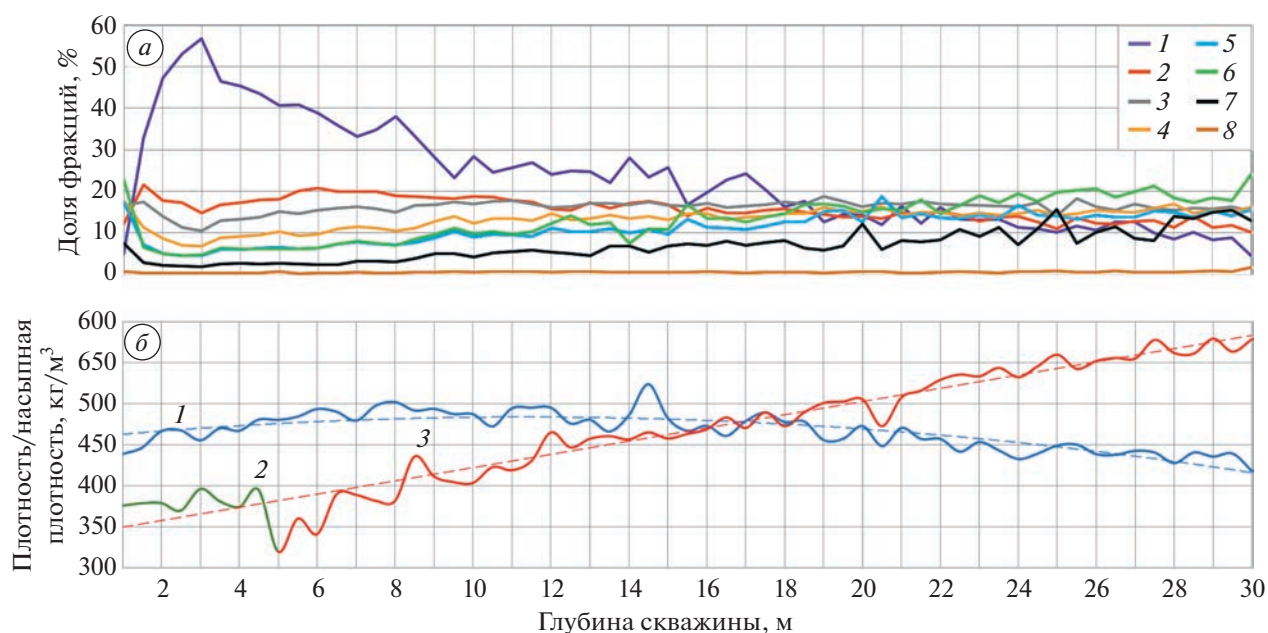
**Определение скорости витания ледяного шлама.** Для проведения эксперимента по определению скорости витания отобраны шесть образцов шлама

с различных горизонтов (5, 10, 15, 20, 25 и 30 м). Каждая проба рассеяна на фракции и для каждой фракции определена насыпная плотность по ранее описанной методике. Для частиц шлама размером менее 0.25 мм насыпную плотность и скорость витания не определяли, потому что доля данной фракции в шламе незначительна (<1%).

Для определения скоростей витания применялся разработанный авторами статьи экспериментальный стенд (рис. 2, *а*). Стенд представляет собой прозрачную трубу витания, изготовленную из органического стекла с внутренним диаметром 123 мм и длиной 1.5 м. На вершине трубы установлена мотор-турбина (VCM-2400-S), создающая разрежение воздуха в верхней её части, что приводит к движению потока воздуха снизу вверх. Чтобы предохранить турбину от попадания в неё частиц шлама, перед ней устанавливался фильтр. Основание стенда, в котором установлена латунная сетка для размещения на ней шлама, выполнено разборным путём шпилек.

В ходе проведения экспериментальных исследований установка располагалась в помещениях бурового комплекса с температурой, не превыша-





**Рис. 3.** Графики зависимостей характеристик снежно-фирновой толщ и ледяного шлама от глубины скважины. *а* – зависимость гранулометрического состава бурового шлама от глубины скважины; фракции шлама с размером частиц: 1 – более 1.6 мм; 2 – 1.25–1.6 мм; 3 – 1–1.25 мм; 4 – 0.8–1 мм; 5 – 0.63–0.8 мм; 6 – 0.4–0.63 мм; 7 – 0.25–0.4 мм; 8 – менее 0.25 мм; *б* – зависимость насыпной плотности шлама и плотности ледяного массива от глубины скважины: 1 – насыпная плотность шлама; 2 – плотность снежно-фирновой толщ по шурфам; 3 – плотность снежно-фирновой толщ по кернам.

**Fig. 3.** Graph of the dependence of the ice cuttings particle size distribution on the depth of the well. *а* – dependence of the characteristics of the snow-firn layer and ice cuttings on the depth of the well; ice cuttings size: 1 – more than 1.6 mm; 2 – 1.25–1.6 mm; 3 – 1–1.25 mm; 4 – 0.8–1 mm; 5 – 0.63–0.8 mm; 6 – 0.4–0.63 mm; 7 – 0.25–0.4 mm; 8 – less than 0.25 mm; *б* – dependence of poured density of ice cuttings and density of ice on borehole depth: 1 – poured density of ice cuttings; 2 – density of the snow-firn layer according to pits; 3 – density of the snow-firn layer according to cores.

ющей  $-20^{\circ}\text{C}$ . Эксперименты выполнялись в следующей последовательности. На сетке размещалась проба шлама (10 г), регулировкой скорости вращения турбины подбирали такую скорость воздушного потока, при которой все частицы ледяного шлама витали над сеткой на расстоянии 1–2 см и не падали на неё (см. рис. 2, б). После визуальной фиксации уравновешенного положения частиц проводили измерение скорости воздушного потока с помощью электронного дифференциального микрометра testo 440 dP, в качестве измерительного зонда применялась трубка Пито–Прандтля. Трубка вводилась в сечение трубы через специальное отверстие и располагалась перпендикулярно потоку воздуха. Измерение скорости воздуха проводили в трёх точках, выбранных согласно методу разбивки сечения воздуховода, на равновеликие площадки (см. рис. 2, в), в каждой из трёх точек было получено 10 значений скорости потока. Таким образом скорость витания для каждой фракции принималась средней по результатам 30 измерений.

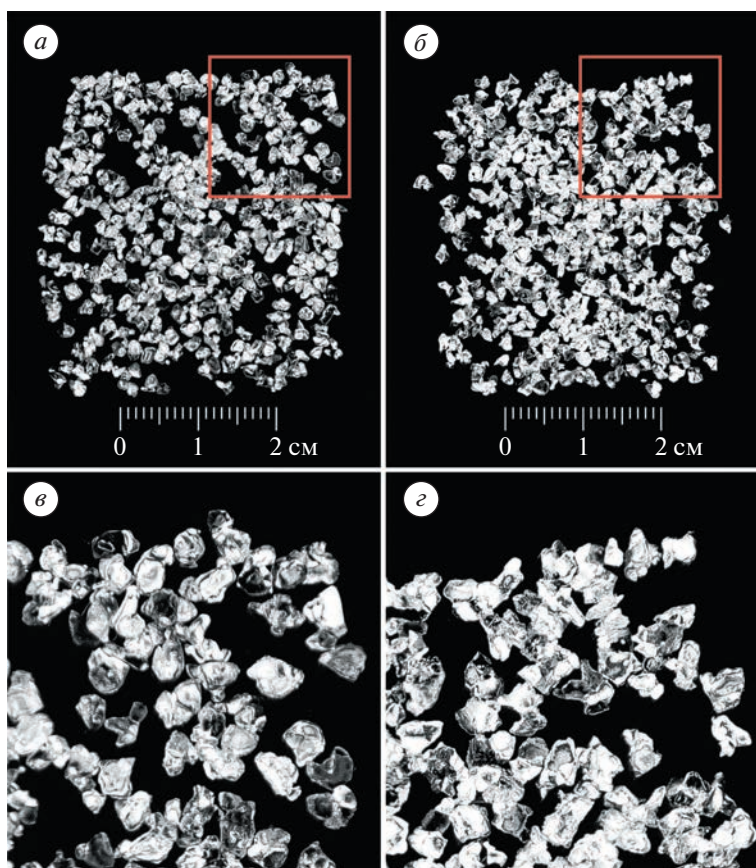
Поскольку в качестве среды применялся воздух (при среднем атмосферном давлении 471 мм. рт. ст. и средней температуре  $-20^{\circ}\text{C}$ ), а объектом

исследования – реальный шлам, то процесс установления взвешенного положения ледяных частиц в экспериментальном стенде можно считать подобным аналогичному процессу при бурении с продувкой в условиях Центральной Антарктиды

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Бурение скважины ВК-22.** Буровые работы выполнялись в течение трёх дней, на достижение глубины забоя 30 м затрачено 14.5 ч, без учёта времени на подготовку площадки бурения и консервацию скважины. Выполнено 59 рейсов, выход керна составил 100%. За первый рейс пройдено 1 м, во всех остальных рейсах проходили 0.5 м.

**Гранулометрический анализ ледяного шлама.** Фракционный состав шлама и преобладающая фракция изменяются с увеличением глубины скважины. До глубины 18.5 м в ледяном шламе преобладали отдельные ледяные зёрна или сrostки зёрен размером более 1.6 мм. Однако на более глубоких горизонтах доля крупного шлама значительно снижалась, шлам становился более мелкозернистым, что отчётливо видно на рис. 3, а. Это объясняется структурным строением снежно-



**Рис. 4.** Сравнение формы частиц ледяного шлама из скважины VK-22 (фракция 1.25–1.6 мм) с глубины 10 м (а) и 30 м (б), где (в) и (г) увеличенное в 2.5 раза изображение каждой фракции соответственно.

**Fig. 4.** Comparison of the shape of ice particles from borehole VK-22 (fraction 1.25–1.6 mm) from a depth of 10 m (a) and 30 m (б), where (в) and (г) are 2.5 times enlarged images of each fraction, respectively.

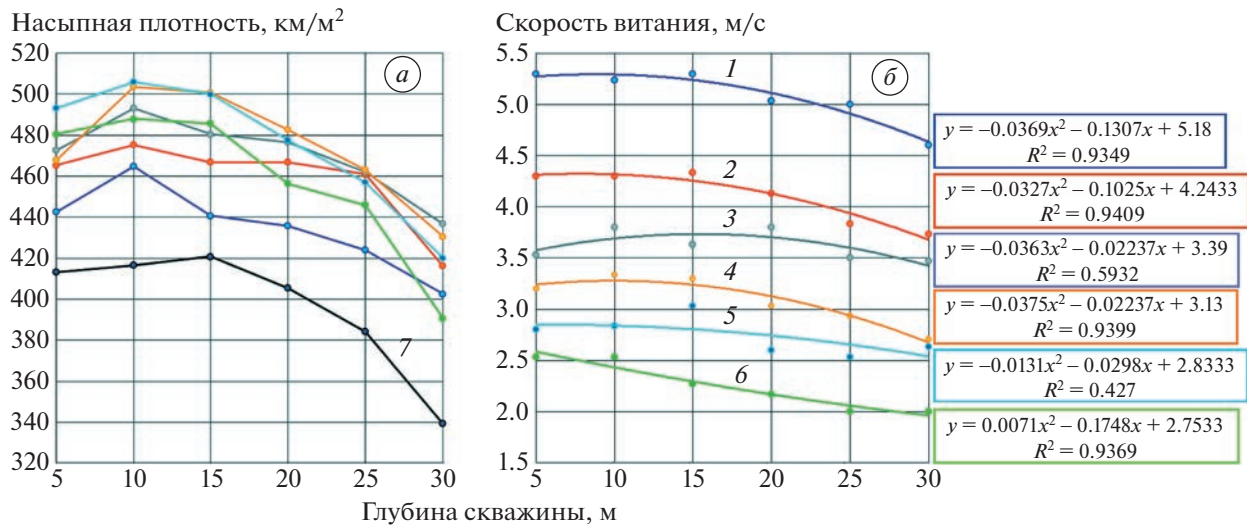
фирновой толщи и механизмом разделения зёрен при бурении, который описан далее по тексту.

**Форма частиц ледяного шлама.** Форма шламовых частиц меняется с глубиной. Шлам с верхних горизонтов представляет собой округлые ледяные частицы неправильной формы, которую можно описать как “компактную” (изометрическую) (Кудряшов, Кирсанов, 1990). Шлам с более глубоких горизонтов содержит угловатую пластинчатую форму (рис. 4). Одним из факторов образования фирна при сухом метаморфизме считается рекристаллизационное округление, при котором ледяные иглы сливаются друг с другом, образуя округлые зёрна. На неглубоких горизонтах залегания ледяные зёрна содержат большую структурную свободу и легко отделяются друг от друга при незначительной нагрузке. Этот факт объясняет, почему шлам с верхних горизонтов в основном состоит из отдельных округлых ледяных зерен. При увеличении глубины плотность ледяного массива растет, пористость уменьшается, размер ледяного зерна увеличивается, как и усилие, которое необходимо приложить, чтобы

отделить одно зерно от другого. Поэтому при бурении плотного фирна происходит не только отделение ледяных зёрен по их границам, но и разрушение их резцами буровой коронки в процессе резания, что приводит к образованию мелкого пластинчатого шлама.

**Плотность снежно-фирновой толщи и насыпного шлама.** Зависимость изменения плотности снежно-фирновой толщи и насыпной плотности ледяного шлама от глубины скважины представлены на рис. 3, б. Форма ледяных частиц напрямую влияет на насыпную плотность шлама, значение которой снижается с увеличением глубины скважины. Насыпная плотность отдельных фракций снижается по той же причине (рис. 5, а). Это объясняется тем, что “компактные” частицы занимают заданный объём с меньшим количеством воздушных пустот, чем пластинчатые.

**Скорость витания ледяного шлама.** Скорость витания для двух наименьших фракций ледяного шлама (<0.25 и 0.25–0.4 мм) составила менее 1.5 м/с, поэтому провести достоверные измерения для них не удалось (для прибора testo 440 dp



**Рис. 5.** Зависимости насыпной плотности (а) и скорости витания (б) ледяного шлама с различных интервалов бурения от глубины скважины; фракции шлама: 1 – более 1.6 мм; 2 – 1.25–1.6 мм; 3 – 1–1.25 мм; 4 – 0.8–1 мм; 5 – 0.63–0.8 мм; 6 – 0.4–0.63 мм; 7 – 0.25–0.4 мм.

**Fig. 5.** Dependence of poured density (a) and critical velocity (б) of ice cuttings from different drilling intervals on borehole depth; ice cuttings size: 1 – more than 1.6 mm; 2 – 1.25–1.6 mm; 3 – 1–1.25 mm; 4 – 0.8–1 mm; 5 – 0.63–0.8 mm; 6 – 0.4–0.63 mm; 7 – 0.25–0.4 mm.

нижней границей диапазона измерения скорости воздуха является значение 1.5 м/с). (см. рис. 5, б; табл. 1).

а также (Шамшев и др., 1983)

$$w = \left( \frac{v}{d} \cdot \exp 10 \cdot \left( \frac{\sqrt{\ln(Ar) + 2.3}}{2.3} - 1 \right) \right) \cdot c, \quad (2)$$

где  $v$  – кинематическая вязкость воздуха ( $1.862 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ );  $d$  – эквивалентный диаметр частицы, мм;  $c$  – поправочный коэффициент формы (для изометрических частиц  $c = 0.7$ ),  $Ar$  – параметр Архимеда.

Параметр Архимеда находится по формуле:

$$Ar = \frac{g \cdot d^3 \cdot (\delta - \rho)}{\rho \cdot v^2}, \quad (3)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения ( $9.83 \text{ м/с}^2$ );  $\delta$  – плотность льда ( $916.7 \text{ кг/м}^3$ );  $\rho$  – плотность воздуха ( $0.866 \text{ кг/м}^3$ ). Значения кинематической вязкости воздуха, плотности воздуха и ускорения

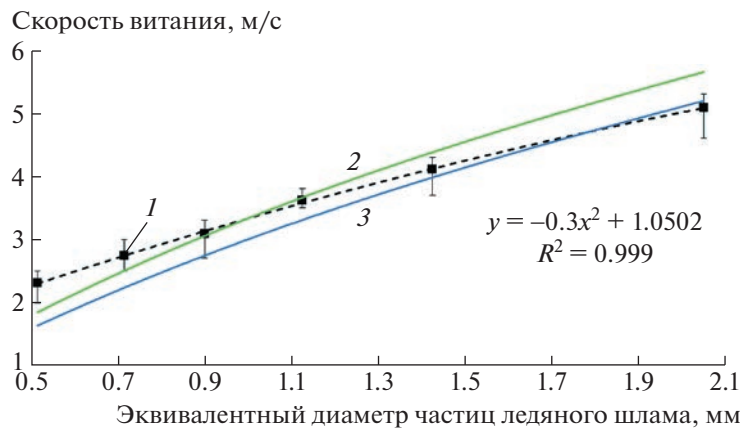
## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данные о зависимостях скорости витания ледяного шлама от его крупности и формы, полученные в ходе экспериментальных работ, можно сравнить с теоретическими данными, полученными с помощью эмпирических формул. Так, из известных формул для расчета скорости витания наиболее близкие к экспериментальным данным значения получаются при применении формулы (Кудряшов, Кирсанов, 1990):

$$w = \left( \frac{v}{d} \cdot \exp 3 \cdot (\sqrt{3 + 1.97 \cdot \ln(Ar)} - 3) \right) \cdot c, \quad (1)$$

**Таблица 1.** Значения скорости витания (м/с) для ледяного шлама различной крупности и глубины залегания

| Фракция ледяного шлама, мм | Глубина скважины, на которой были отобраны образцы шлама, м |     |     |     |     |     |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                            | 5                                                           | 10  | 15  | 20  | 25  | 30  |
| 1.6>                       | 5.3                                                         | 5.2 | 5.3 | 5   | 4.6 | 5   |
| 1.25–1.6                   | 4.3                                                         | 4.3 | 4.3 | 4.1 | 3.8 | 3.7 |
| 1–1.25                     | 3.5                                                         | 3.8 | 3.6 | 3.8 | 3.5 | 3.5 |
| 0.8–1                      | 3.2                                                         | 3.3 | 3.3 | 3   | 2.9 | 2.7 |
| 0.63–0.8                   | 2.8                                                         | 2.8 | 3   | 2.6 | 2.5 | 2.6 |
| 0.4–0.63                   | 2.5                                                         | 2.5 | 2.3 | 2.2 | 2   | 2.4 |



**Рис. 6.** Зависимость скорости витания от среднего размера частиц ледяного шлама для данных, полученных в ходе эксперимента и на основании эмпирических формул. 1 – средние значения и полиномиальный тренд экспериментальных данных; 2 – зависимость, построенная по формуле (1); 3 – зависимость, построенная по формуле (2).

**Fig. 6.** Dependence of critical velocity on average ice cuttings particle size for experimental data and empirical formulas data. 1 – mean values and polynomial trend of experimental data; 2 – dependence based on formula (1); 3 – dependence based on formula (2).

свободного падения, используемые для вычислений, соответствуют условиям проведения эксперимента на станции Восток.

Сравнение значений скорости витания, полученных с помощью формул (1) и (2), с экспериментальными данными представлено в табл. 2 и на рис. 6. Результаты вычислений указывают на соответствие экспериментальных данных эмпирическим формулам; так, средняя погрешность для формулы (1) составляет 13.1%, а для формулы (2) 15.2%. Такая погрешность может объясняться неточностью измерений скорости витания во время проведения экспериментальных исследований для малых частиц ледяного шлама, так как установить их визуально уравновешенное состояние витания сложнее, чем для крупных частиц. Однако для инженерных расчётов, связанных с проектированием бурового оборудования, скорость витания определяют только для наиболь-

шей фракции. Таким образом, формулу (2) можно рекомендовать для теоретического определения скорости витания ледяного шлама в условиях Центральной Антарктиды (так как погрешность для наибольшей фракции шлама составляет всего 2.2%, см. табл. 2).

Проведённые экспериментальные исследования позволили получить уникальные данные о свойствах снежно-фирновой толщи Центральной Антарктиды. Принимая во внимание, что процесс снегонакопления в Центральной Антарктиде изучался на протяжении десятилетий, полученные в ходе экспериментальных исследований данные о плотности снежно-фирновой толщи носят исключительно уточняющий характер. Однако информация о гранулометрическом составе ледяного шлама, его насыпной плотности и скорости витания в зависимости от глубины залегания была получена впервые.

**Таблица 2.** Экспериментальные значения скорости витания и значения, полученные с помощью эмпирических формул

| $d$ , мм | Средняя экспериментальная скорость витания $w_3$ , м/с | Скорость витания по формуле (1) $w_1$ , м/с | Скорость витания по формуле (2), $w_2$ , м/с | $((w_1 - w_3)) / w_3 \times 100$ , % | $ ((w_2 - w_3) / w_3) \times 100 $ , % |
|----------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|
| 2.05     | 5.1                                                    | 5.4                                         | 5.2                                          | +6.5                                 | +2.2                                   |
| 1.425    | 4.1                                                    | 4.2                                         | 4.0                                          | +1.3                                 | –3.1                                   |
| 1.125    | 3.6                                                    | 3.5                                         | 3.3                                          | –4.6                                 | –8.8                                   |
| 0.9      | 3.1                                                    | 2.9                                         | 2.7                                          | –7.0                                 | –11.1                                  |
| 0.715    | 2.7                                                    | 2.3                                         | 2.2                                          | –14.7                                | –18.4                                  |
| 0.515    | 2.3                                                    | 1.7                                         | 1.6                                          | –26.3                                | –29.3                                  |
| 0.325    | 1.5                                                    | 1.0                                         | 1.0                                          | –31.3                                | –33.5                                  |



Бурение глубоких скважин на станции Восток ведётся уже более 50 лет и за это время процесс бурения с призабойной циркуляцией заливочной жидкости детально изучен. Однако процесс движения воздуха по длинным каналам с различными осевыми сечениями сильно отличается от процесса движения несжимаемой жидкости (Кудряшов, Кирсанов, 1990). Таким образом, прежде неизвестные значения скоростей витания частиц ледяного шлама позволяют провести расчёт параметров бурового снаряда на грузонесущем кабеле с обратной призабойной циркуляцией воздуха (скорость и расход воздуха, частота вращения буровой коронки, конструктивные параметры шламоборных фильтров и т.д.). Данные о фракционном составе шлама и его форме будут положены в основу математической модели процесса бурения, а также позволят произвести репрезентативное конечно-элементное моделирование (Shammazov et al., 2022; Белоглазов и др., 2022), что повысит эффективность работ по созданию экспериментального бурового снаряда на грузонесущем кабеле.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачи, запланированные в рамках экспериментальных исследований по изучению процесса движения ледяного шлама при бурении снежно-фирновой толщи, полностью выполнены в сезоне 67 РАЭ. Пробурена скважина VK-22 глубиной 30 м с полным отбором керна и образцов ледяного шлама. По результатам исследования образцов керна и ледяного шлама из скважины VK-22 построен профиль плотности снежно-фирновой толщи и насыпной плотности ледяного шлама до глубины 30 м. Плотность снежно-фирновой толщи линейно возрастает с глубиной (от 319 до 578 кг/м<sup>3</sup>), в то время как насыпная плотность ледяного шлама изменяется нелинейно: максимальное значение 523 кг/м<sup>3</sup> на глубине 14.5 м, а минимальное значение 417 кг/м<sup>3</sup> на глубине 30 м. Исследованы зависимости изменения гранулометрического состава и формы ледяного шлама снежно-фирновой толщи Центральной Антарктиды в зависимости от глубины его залегания. С глубиной крупность шлама снижается, так на глубине 3 м доля крупного шлама (более 1.6 мм) составляет 56.7%, в то время как на глубине 30 м — всего 4.4%. Форма частиц ледяного шлама с увеличением глубины изменяется от округлой к пластинчатой. Средняя скорость витания для наибольшей фракции ледяного шлама составила 5.1 м/с, достоверность этого значения подтверждается расчётными формулами.

Полученные результаты будут применены при разработке нового бурового снаряда на грузонесущем кабеле с обратной призабойной циркуляцией воздуха. Помимо этого, представленные в

статье данные могут быть применены иностранными научными коллективами при разработке (Cao et al., 2018; Cao et al., 2019) или модернизации (Gibson et al., 2021) собственных систем бурения с очисткой забоя воздухом.

Работы на экспериментальном стенде выявили его достоинства и недостатки, и пути его дальнейшего совершенствования. Планируется увеличить мощность мотор-турбины и усовершенствовать механизм подачи шлама на сетку основания стенда. Эти изменения позволят дополнительно выполнить исследования, позволяющие найти эффективную скорость транспортировки ледяного шлама; изучению процесса эрозионного разрушения фирнового керна восходящим потоком воздуха; изучению механизма заполнения шламоборных фильтров различных конструкций (сетчатых, циклонных).

Продолжение экспериментальных работ запланировано в сезон 68 РАЭ, а их результаты позволят заполнить многие пробелы в знаниях о процессе бурения верхнего снежно-фирнового горизонта высокогорного Антарктического плато и приступить к разработке экспериментального образца бурового снаряда на грузонесущем кабеле с обратной призабойной циркуляцией воздуха. Названная тема найдет отражение в дальнейших публикациях нашего авторского коллектива.

**Благодарности.** Коллектив авторов выражает благодарность персоналу станции Восток в сезоне 67 РАЭ и научным сотрудникам ЛИКОС Алексею Екайкину и Ирине Алёхиной за оказанное содействие в проведении экспериментальных работ. Мы также благодарим всех рецензентов за их конструктивные комментарии к нашей работе, которые помогли существенно улучшить статью. Исследование выполнено с помощью субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2022 г. № FSRW-2021-0011.

**Acknowledgments.** The team of authors would like to express their gratitude to the staff of the Vostok station of the 67th RAE and to the scientists of LIKOS Alexey Ekaykin and Irina Alekhina, for their assistance in carrying out the experimental work. We also thank all the reviewers for their insightful comments on our work and helped us to improve the paper substantially. The research was performed at the expense of the subsidy for the state assignment in the field of scientific activity for 2022 № FSRW-2021-0011.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белоглазов И.И., Сабинин Д.С., Николаев М.Ю. Моделирование процесса дезинтеграции в шаровых мельницах барабанного типа с использованием метода дискретных элементов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6.

- С. 268–282.  
[https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_62\\_0\\_268](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_268)
- Большунов А.В., Васильев Д.А., Игнатъев С.А., Дмитриев А.Н., Васильев Н.И. Механическое бурение ледников с очисткой забоя сжатым воздухом // *Лёд и Снег*. 2022. Т. 62. № 1. С. 35–46.  
<https://doi.org/10.31857/S2076673422010114>
- Верес А.Н., Екайкин А.А., Липенков В.Я., Туркеев А.В., Ходжер Т.В. 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.  
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-482-500>
- Екайкин А.А., Тебенёкова Н.А., Липенков В.Я., Чихачев К.Б., Верес А.Н., Рихтер А. Недооценка скорости снегонакопления в центральной части Антарктиды (станция Восток) по данным речечных наблюдений // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 2. С. 114–125.
- Калесник С.В. Очерки гляциологии // М.: Гос. изд-во географической литературы, 1963. 436 с.
- Кудряшов Б.Б., Кирсанов А.И. Бурение разведочных скважин с применением воздуха // М.: Недра, 1990. 263 с.
- Липенков В.Я. Закономерности формирования системы включений воздуха в рекристаллизационном льду // *Криосфера Земли*. 2018. Т. 22. № 2. С. 16–28.  
[https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2\(16-28\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2(16-28))
- Липенков В.Я., Саламатин А.Н. Установившееся распределение пузырьков воздуха по размерам в рекристаллизационном льду // *Лёд и Снег*. 2014. Т. 54. № 4. С. 20–31.  
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-4-20-31>
- Саватюгин Л.М., Архипов С.М., Васильев Н.И., Вострецов Р.Н., Фритцше Д., Миллер Х. Российско-германские гляциологические исследования на Северной Земле и прилегающих островах в 2000 г. // *МГИ*. 2001. № 91. С. 150–162.
- Шамшев Ф.А., Тараканов С.Н., Кудряшов Б.Б., Парийский Ю.М., Яковлев А.М. Технология и техника разведочного бурения. Учебник. 3 изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1983. 565 с.
- Шумский П.А. Основы структурного ледоведения // М.: Изд-во АН СССР, 1955. 492 с.
- Cao P., Zhao Q., Chen Z., Cao H., Chen B. Orthogonal experimental research on the structural parameters of a novel drill bit used for ice core drilling with air reverse circulation // *Journ. of Glaciology*. 2019. V. 65. № 254. P. 1011–1022.  
<https://doi.org/10.1017/jog.2019.76>
- Cao P., Liu M., Chen Z., Chen B., Zhao Q. Theory calculation and testing of air injection parameters in ice core drilling with air reverse circulation // *Polar Science*. 2018. V. 17. P. 23–32.  
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.06.005>
- Cuffey K.M., Paterson W.S.B. The Physics of Glaciers. // Burlington: Academic Press. 2010. V. 4. 704 p.
- Fritzsche D., Wilhelms F., Savatyugin L., Pinglot J., Meyer H., Hubberten H., Miller H. A new deep ice core from Akademii Nauk ice cap, Severnaya Zemlya, Eurasian Arctic: First results // *Annals of Glaciology*. 2002. V. 35. P. 25–28.  
<https://doi.org/10.3189/172756402781816645>
- Gendler S., Prokhorova E. Risk-Based Methodology for Determining Priority Directions for Improving Occupational Safety in the Mining Industry of the Arctic Zone // *Resources*. 2021. V. 10. № 20.  
<https://doi.org/10.3390/resources10030020>
- Gibson C., Boeckmann G., Meulemans Z., Kuhl T., Koehler J., Johnson J., Slawny K. RAM-2 Drill system development: An upgrade of the Rapid Air Movement Drill // *Annals of Glaciology*. 2020. V. 62. № 84. P. 1–10.  
<https://doi.org/10.1017/aog.2020.72>
- Hong J., Xiaopeng F., Yunchen L., Gang L., Bowen L., Talalay P. Size distribution and shape characteristics of ice cuttings produced by an electromechanical auger drill // *Cold Regions Science and Technology*. 2015. V. 119. P. 204–210.  
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.08.012>
- Hu Z., Talalay P., Zheng Z., Cao P., Shi G., Li Y., Ma H. Air reverse circulation at the hole bottom in ice-core drilling // *Journ. of Glaciology*. 2019. V. 65. № 249. P. 149–156.  
<https://doi.org/10.1017/jog.2018.95>
- 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* 2019. 2019. P. 487–494.  
<https://doi.org/10.1201/9781003014638-2>
- Litvinenko, V.S., Leitchenkov, G.L., Vasiliev, N.I. Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling // *Chemie der Erde – Geochemistry*. 2020. V. 80. № 3. P. 125556.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.125556>
- Shammazov I., Sidorkin D., Dzhemilev E. Research of the Dependence of the Pipeline Ends Displacement Value When Cutting Out Its Defective Section on the Elastic Stresses in the Pipe Body // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. № 1. P. 22077–22077.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/2/022077>
- Sultanbekov R., Islamov S., Mardashov D., Beloglazov I., Hemmingsen T. Research of the Influence of Marine Residual Fuel Composition on Sedimentation Due to Incompatibility // *Journ. of Marine Science and Engineering*. 2021. V. 9. № 10.  
<https://doi.org/10.3390/jmse9101067>
- Wang R., Liu A., Sun Y., Cao P., Fan X., Talalay P. Ice drill testing facility // *Cold Regions Science and Technology*. 2017. V. 145. P. 151–159.  
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.10.017>
- Whelsky A.N., Albert M.R. Firn permeability impacts on pressure loss associated with rapid air movement drilling // *Cold Regions Science and Technology*. 2016. V. 123. P. 149–154.  
<https://doi.org/10.1016/J.COLDREGIONS.2015.11.018>

Citation: Ignatiev S.A., Vasilev D.A., Bolshunov A.V., Vasileva M.A., Ozhigin A.Yu. Experimental research of ice cuttings transport by air while drilling of the snow-firn layer. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (1): 141–152 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423010076

## Experimental Research of Ice Cuttings Transport by Air While Drilling of the Snow-Firn Layer

S. A. Ignatiev<sup>a</sup>, D. A. Vasilev<sup>a, #</sup>, A. V. Bolshunov<sup>a</sup>, M. A. Vasileva<sup>a</sup>, and A. Yu. Ozhigin<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

<sup>#</sup>e-mail: Vasilev\_DA@pers.spmi.ru

The snow-firn layer of the glaciers of Antarctica and Greenland contains data on the composition of the atmosphere in the past, volcanic eruptions, forest fires, anthropogenic pollution, and many other unique information. Nowadays, core drilling methods are widely used for sampling the snow-firn layer. Due to numerous complications (loss of air circulation, drill bit sticking, ice balling up, etc.), air ice drilling is not wide spread, yielding in productivity and reliability to thermal and auger drilling methods. However, core barrel drilling with reverse bottom-hole air circulation is a promising technology for drilling the glaciers of Antarctica and Greenland. However, core drilling with reverse bottom-hole air circulation is a promising technology for drilling Antarctic and Greenland glaciers. The authors suggest that this technology, if successfully implemented, will significantly exceed the currently used methods of drilling the upper layers of the glacier. Taking into account the failures of previous projects of core drilling with air, it was decided to conduct research in the conditions of Central Antarctica in order to substantiate the design parameters of the new drill. During 67th Russian Antarctic Expedition (RAE) experimental studies of ice cuttings air transportation while drilling of the snow-firn layer were conducted at Vostok station. In the course of the experimental studies, the VK-22 borehole was drilled to a depth of 30 m with full core and ice cuttings sampling. According to the selected probes, the dependences of the change in the density of the snow-firn layer, bulk density and fractional composition of ice cuttings on the depth of occurrence were established. By using the experimental facility, the suspension velocity (critical speed in drilling) of ice particles of various sizes and shapes was found for the first time. Directions for further research and ways to improve the experimental facility are proposed, which are planned to be implemented in the season of the 68th RAE

**Keywords:** Central Antarctica, air drilling, ice cuttings, critical speed, suspension velocity, core, snow, firn

## REFERENCES

- Beloglazov I.I., Sabinin D.S., Nikolaev M.Yu. Modeling the disintegration process in ball mills using the discrete element method. *Gorny informacionno-analiticheskij byulleten*. Mining informational and analytical bulletin. 2022, (6): 268–282 [In Russian].  
https://doi.org/10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_268
- Bolshunov A.V., Vasilev D.A., Ignatiev S.A., Dmitriev A.N., Vasilev N.I. Mechanical drilling of glaciers with bottom-hole scavenging with compressed air. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2022, 62 (1): 35–46 [In Russian].  
https://doi.org/10.31857/S2076673422010114
- Veres A.N., Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Turkeev A.V., Hodzher T.V. First data on the climate variability in the vicinity of Vostok Station (Central Antarctica) over the past 2,000 years based on the study of a snow-firn core. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2020, 66 (4): 482–500 [In Russian].  
https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-482-500
- Ekaykin A.A., Teben'kova N.A., Lipenkov V.Y., Chihachev K.B., Veres A.N., Richter A. Underestimation of snow accumulation rate in Central Antarctica (Vostok station) derived from stake measurements. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and hydrology. 2020, (4): 114–125 [In Russian].
- Kalesnik S.V. *Ocherki glyaciologii*. Essays on glaciology. Moscow: State publishing house of geographical literature. 1963: 436 p. [In Russian].
- Kudryashov B.B., Kirsanov A.I. *Burenie razvedochnykh skvazhin s primeneniem vozduha*. Drilling of exploratory wells using air. Moscow: Nedra, 1990: 263 p. [In Russian].
- Lipenkov V.Y. How air bubbles form in polar ice. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2018, 22 (2): 6–28. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2018-2(16-28). [In Russian].
- Lipenkov V.Y., Salamatin A.N. Steady-state size distribution of air bubbles in polar ice. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2014, 54 (4): 20–31 [In Russian].  
https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-4-20-3.
- Savatyugin L.M., Arhipov S.M., Vasil'ev N.I., Vostrecov R.N., Fritsche D., Miller H. Russian-German glaciological studies at Severnaya Zemlya and adjacent islands in 2000. *Materialy Glyastiologicheskikh Issledovaniy*. Date of Glaciological Studies. 2001, 91: 150–162 [In Russian].
- Shamshev F.A., Tarakanov S.N., Kudryashov B.B., Parijskij Yu.M., Yakovlev A.M. *Tekhnologiya i tekhnika raz-*

- vedochnogo bureniya*. Exploration drilling technology and techniques. Textbook. 3rd ed., reprint and additional. M.: Nedra, 1983: 565 p. [In Russian].
- Shumskij P.A.* *Osnovy strukturnogo ledovedeniya*. Fundamentals of structural glaciology. Moscow: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1955: 492 p. [In Russian].
- Cao P., Zhao Q., Chen Z., Cao H., Chen B.* Orthogonal experimental research on the structural parameters of a novel drill bit used for ice core drilling with air reverse circulation. *Journ. of Glaciology*. 2019, 65 (254): 1011–1022.  
<https://doi.org/10.1017/jog.2019.76>.
- Cao P., Liu M., Chen Z., Chen B., Zhao Q.* Theory calculation and testing of air injection parameters in ice core drilling with air reverse circulation. *Polar Science*. 2018, 17: 23–32.  
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.06.005>.
- Cuffey K.M., Paterson W.S.B.* *The Physics of Glaciers*. Burlington: Academic Press. 2010 (4): 704.
- Fritzsche D., Wilhelms F., Savatyugin L., Pinglot J., Meyer H., Hubberten H., Miller H.* A new deep ice core from Akademii Nauk ice cap, Severnaya Zemlya, Eurasian Arctic: First results. *Annals of Glaciology*. 2002, 35: 25–28.  
<https://doi.org/10.3189/172756402781816645>.
- Gendler S., Prokhorova E.* Risk-Based Methodology for Determining Priority Directions for Improving Occupational Safety in the Mining Industry of the Arctic Zone. *Resources*. 2021, 10 (20).  
<https://doi.org/10.3390/resources10030020>.
- Gibson C., Boeckmann G., Meulemans Z., Kuhl T., Koehler J., Johnson J., Slawny K.* RAM-2 Drill system development: An upgrade of the Rapid Air Movement Drill // *Annals of Glaciology*. 2020, 62 (84): 1–10.  
<https://doi.org/10.1017/aog.2020.72>.
- Hong J., Xiaopeng F., Yunchen L., Gang L., Bowen L., Talalay P.* Size distribution and shape characteristics of ice cuttings produced by an electromechanical auger drill. *Cold Regions Science and Technology*. 2015, 119: 204–210.  
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.08.012>.
- Hu Z., Talalay P., Zheng Z., Cao P., Shi, G., Li Y., Ma H.* Air reverse circulation at the hole bottom in ice-core drilling. *Journ. of Glaciology*. 2019, 5 (249): 149–156.  
<https://doi.org/10.1017/jog.2018.95>.
- 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* 2019. 2019: 487–494.  
<https://doi.org/10.1201/9781003014638-2>.
- Litvinenko V.S., Leitchenkov G.L., Vasiliev N.I.* Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling. *Chemie der Erde – Geochemistry*. 2020, 80 (3): 125556 p.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.125556>.
- Shammazov I., Sidorkin D., Dzhemilev E.* Research of the Dependence of the Pipeline Ends Displacement Value When Cutting Out Its Defective Section on the Elastic Stresses in the Pipe Body. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022, (1): 22077–22077.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/2/022077>.
- Sultanbekov R., Islamov S., Mardashov D., Beloglazov I., Hemmingsen T.* Research of the Influence of Marine Residual Fuel Composition on Sedimentation Due to Incompatibility. *Journ. of Marine Science and Engineering*. 2021, 9 (10): 1067.  
<https://doi.org/10.3390/jmse9101067>.
- Wang R., Liu A., Sun Y., Cao P., Fan X., Talalay P.* Ice drill testing facility. *Cold Regions Science and Technology*. 2017, 145: 151–159.  
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.10.017>.
- Whelsky A.N., Albert M.R.* Firn permeability impacts on pressure loss associated with rapid air movement drilling. *Cold Regions Science and Technology*. 2016, 123: 149–154.  
<https://doi.org/10.1016/J.COLDREGIONS.2015.11.018>