



Научная статья

Геотехнология и инженерная геология

Комплексные исследования снежно-фирновой толщи в районе российской антарктической станции Восток

А.В.Большунов, С.А.Игнатьев, Г.Д.Горелик, Н.С.Крикун, Д.А.Васильев✉, И.В.Ракитин, В.С.Шадрин
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Большунов А.В., Игнатьев С.А., Горелик Г.Д., Крикун Н.С., Васильев Д.А., Ракитин И.В., Шадрин В.С. Комплексные исследования снежно-фирновой толщи в районе российской антарктической станции Восток // Записки Горного института. 2025. Т. 273. № 16470. С. 52-64. [EDN KBAZNU](https://doi.org/10.26907/2541-9404.2025.16470)

Аннотация

В статье представлены результаты научно-исследовательских работ, проведенных в рамках 69-й Российской антарктической экспедиции на станции Восток. Основная цель исследований – комплексное изучение снежно-фирновой толщи с использованием прямых (бурение и анализ керна) и косвенных (георадиолокация и сейсморазведка) методов. В рамках исследований решались фундаментальные задачи, связанные с изучением структуры и динамики верхней части ледникового щита, а также прикладные, направленные на обоснование глубины размещения заряда взрывчатых веществ для проведения сейсмических работ с целью детального изучения подледникового озера Восток и выбора точки заложения скважины доступа к озеру. Получены данные о микроструктуре и физических свойствах снежно-фирновой толщи. Результаты позволяют в будущем дополнить модель уплотнения фирна, необходимую для понимания эволюции ледяных зерен на ранних стадиях метаморфизма. Результаты работ внесли вклад в представление об особенностях строения приповерхностной части ледникового щита, позволили более точно определять структурные и физические характеристики снежно-фирновой толщи и льда, что может способствовать лучшему пониманию климатических и геологических процессов в Антарктиде.

Ключевые слова

Антарктида; станция Восток; снежно-фирновая толща; сейсмические исследования; георадиолокационные исследования; бурение; междисциплинарные связи

Финансирование

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

Поступила: 27.04.2024

Принята: 07.11.2024

Онлайн: 05.03.2025

Опубликована: 07.07.2025

Введение

Основными источниками информации, необходимой для изучения ледников, подледниковых водоемов и коренных пород Антарктиды, являются геофизические и буровые работы, совместное выполнение которых позволяет получить наиболее достоверные данные об исследуемом геологическом объекте.

Геофизические работы на шестом континенте представлены радиолокацией и сейсморазведкой, основаны на использовании электромагнитных и упругих волн, которые хорошо распространяются во льду. Также используются гравиметрия, магнитометрия и лазерная альтиметрия. Благодаря большому объему исследований отечественным и зарубежным специалистами удалось установить мощность ледникового покрова и выявить особенности подледного рельефа Антарктиды [1-4]. Одной из наиболее интересных геофизических работ, выполненной российскими учеными, является проведенный в период 1995-2015 гг. сотрудниками Полярной морской геологоразведочной экспедиции комплекс сейсмических и радиолокационных исследований озера Восток – самого большого подледникового водоема на Земле [1, 5, 6].

При бурении ледников хорошо себя зарекомендовали механические и тепловые способы [7, 8]. Самым значимым проектом, реализованным отечественными специалистами – сотрудниками Ленинградского горного института (ныне Санкт-Петербургский горный университет императрицы



Екатерины II), является проект бурения глубокой скважины 5Г на станции Восток и вскрытия одноименного подледникового озера в 2012 и 2015 годах [9].

Новый этап научно-исследовательских работ в Антарктиде связан с решением задач Мероприятия 21 «Комплексные исследования подледникового озера Восток и палеоклимата Земли в районе российской антарктической станции Восток» (Распоряжение Правительства РФ от 30 июня 2021 г. № 1767-р Об утверждении плана мероприятий по реализации Стратегии развития деятельности РФ в Антарктике до 2030 г.), которые невозможно выполнить без совместного применения геофизических и буровых работ при изучении уникальных природных объектов данного района Антарктиды. Центром будущих научных исследований станет новый зимовочный комплекс станции Восток, открытие которого состоялось в январе 2024 г.

С декабря 2023 г. по февраль 2024 г. в рамках сезона 69-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) на станции Восток сотрудниками Санкт-Петербургского горного университета были проведены работы, направленные на комплексное изучение снежно-фирновой толщи (СФТ), основанное на применении косвенных (георадиолокация и сейсморазведка) и прямых (бурение и микроструктурный анализ) способов исследований.

Знания об особенностях микроструктурного строения и состава включений СФТ дают представление о процессе эволюции ледяных зерен на различных этапах катагенеза, позволяют реконструировать особенности их роста, деформации и постседиментационных преобразований. Накопленные данные позволяют дополнить существующие модели процесса уплотнения фирна – это проблема, которая на сегодняшний момент решена лишь частично [10-13]. Особенности микроструктуры приповерхностной части ледникового щита Антарктиды, в том числе морфология и ориентировка зерен, данные о межзерновых пространственных отношениях и др. обуславливают физико-механические характеристики отложений [14-16]. Эта информация позволяет реконструировать условия формирования фирна [17, 18], температуру и динамику среды, подобрать оптимальные параметры и технологии бурения [19-21].

Ледники несут в себе уникальную информацию о составе и температуре атмосферы, позволяющую реконструировать палеоклиматические условия на планете Земля. В верхней части ледникового щита Антарктиды сосредоточены данные о вулканических извержениях, лесных пожарах, техногенных загрязнениях, скорости снегонакопления за последние несколько тысяч лет [22, 23]. Изучение СФТ осуществляется как в рамках глобальных международных проектов, так и в формате индивидуальных исследований [24-27]. Ведется активная работа по реализации проектов Международного партнерства в области изучения ледяных кернов (IPICS), среди которых можно выделить CLIVASH2k [28] и IPICS 2k [29]. Целями этих проектов являются создание и изучение глобального массива данных об изменениях климата нашей планеты за последние 2000 лет на основании информации, полученной из ледяных кернов.

Методы

Геофизические исследования и математическое моделирование. Для обоснования системы сейсмических наблюдений 69-й РАЭ, проведенных по профилям, расположенным в 1 км северо-восточнее станции Восток (рис.1), было выполнено математическое моделирование синтетических сейсмограмм.

Расчет зависимости изменения скорости распространения продольных волн в СФТ района станции Восток с глубиной был проведен инженером Научного центра «Арктика» Горного университета Д.Е.Ушаковым. При расчете использовался профиль плотности в районе станции Восток, полученный отечественными исследователями [23].

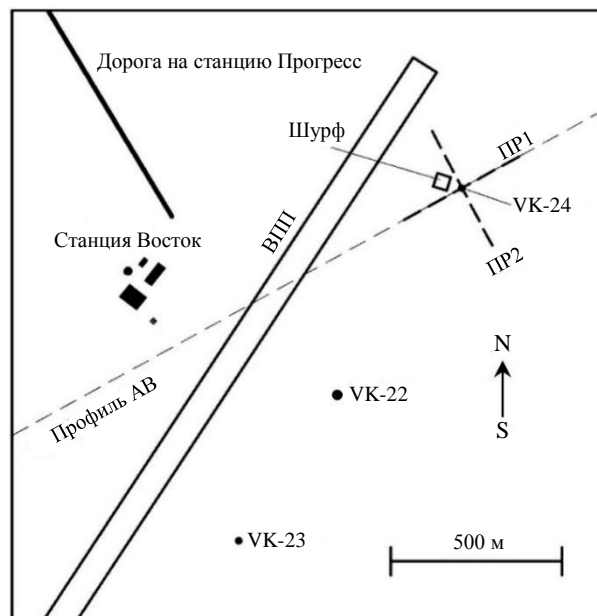


Рис.1. Схема расположения скважин VK-22, 23, 24, шурфа, сейсмических и георадиолокационных профилей (PP1, 2), AB – глубинный сейсмический профиль [6]



Основополагающей работой, в которой представлена зависимость между скоростью распространения продольных волн и плотностью СФТ, является публикация [30], где приводится эмпирическое соотношение профиля плотности СФТ и скорости распространения продольных волн:

$$\rho(z) = 0,915 \left[1 + \left(\frac{V_{p,ice} - V_p(z)}{2,25} \right)^{1,22} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где ρ – плотность СФТ, г/см³; V_p – скорость продольных волн, км/с; $V_{p,ice} = 3,864$ км/с – скорость продольных волн во льду [31].

С использованием профиля плотности СФТ из работы [23] и функции (1) выполнен расчет теоретической скоростной модели среды для прогнозирования скорости распространения упругих волн в изучаемом горизонте (рис.2, а).

Константы в зависимости (1) изменяются от станции к станции, от континента к континенту. Конкретно эти константы, согласно исследованию [30], были определены из сейсмических данных и плотностей СФТ в районах обеих станций Бэрд в Западной Антарктиде и проверены на примерах некоторых буровых работ в Антарктиде и Гренландии. Подобные константы для станции Восток в опубликованной литературе не встречаются и, вероятно, вовсе не были определены, однако для задачи моделирования с целью обоснования системы сейсмических наблюдений можно воспользоваться значениями констант, приведенными в работе [30].

В работе [32] приведен график пластовых скоростей продольных волн, полученный по результатам вертикального сейсмического профилирования, выполненного в скважине 5Г. Пластовые скорости в слоях льда на глубинах более 100 м меняются от 3,82 до 4,12 км/с. При моделировании синтетических сейсмограмм нижележащая среда была задана однородной со скоростью распространения упругих волн 3,9 км/с, поскольку не представляет интереса при изучении строения верхней части разреза.

Моделирование синтетических сейсмограмм (рис.2, б) проведено в программном обеспечении Tesseral Pro (Tesseral Technologies Inc, Канада). Известно, что в среде с положительным градиентом (плавным возрастанием) скорости волн с глубиной распространяются рефрагированные волны. Такие волны характеризуются непрерывным изменением угла наклона луча с глубиной.

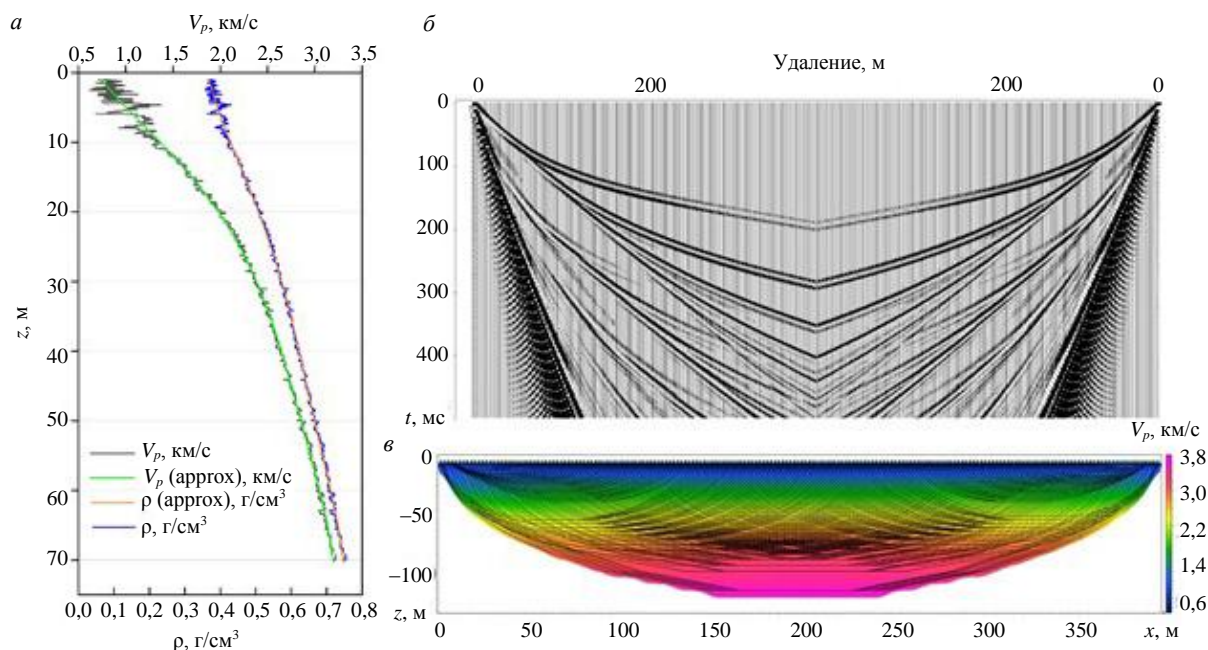


Рис.2. Зависимость скорости продольных волн и плотности от глубины (а); фланговые синтетические сейсмограммы (б); результат томографической обработки синтетических сейсмограмм (в)

V_p – скорость продольных волн; V_p (аппрох) – аппроксимационная теоретическая кривая скорости продольных волн;
 ρ – плотность СФТ; ρ (аппрох) – аппроксимационная теоретическая кривая плотности СФТ; z – глубина; черные линии на глубинно-скоростном разрезе – траектории сейсмических лучей



В соответствии с законом преломления луч, выходящий в точку на земной поверхности, не может проникнуть на глубину больше некоторой предельной глубины, на которой угол преломления будет равен 90° . Отсюда можно сделать вывод, что глубинность метода зависит не только от скоростных характеристик среды, но и от базы наблюдения (взрыв-прибор) или максимального удаления. Чем больше это расстояние, тем больше глубина проникновения регистрируемой сейсмической рефрагированной волны в исследуемую среду. Традиционно считается, что глубина исследования для метода первых вступлений составляет от $1/4$ до $1/10$ максимального удаления. Таким образом, для исследования СФТ мощностью 100 м необходимо использовать базу наблюдений от 400 до 1000 м. Моделирование было выполнено с максимальным удалением 400 м от пункта возбуждения (ПВ) до пункта приема (ПП). На синтетических сейсмограммах (рис.2, б) прослеживаются выходящие в первые вступления годографы рефрагированных волн. Для оценки глубины проникновения сейсмических лучей была проведена обработка рассчитанных синтетических сейсмограмм томографическим способом в программе ZondST2D (ZOND Geophysical software, Россия). Результат представлен на рис.2, в.

Результаты обработки показывают, что максимальная глубина проникновения сейсмических лучей при таких удалениях ПВ-ПП составляет 100-110 м, что позволяет при благоприятных сейсмогеологических условиях проведения работ изучить разрез на всю целевую глубину.

Полевые наблюдения. В сезон 69-й РАЭ в распоряжении авторов было две сейсморегирующие системы: бескабельная SCOUT (СКБ-СП, Россия) (количество каналов – 28) и кабельная ТЕЛСС-3 (Геосигнал, Россия) (шаг пунктов приема – 2 м, количество каналов – 96). Максимальное удаление ПВ-ПП без учета выносных пунктов возбуждения, которое может быть получено на ТЕЛСС-3, составляет 190 м. Недостающая до определенных по результатам моделирования 400 м длина приемной расстановки была добавлена по флангам расстановки ТЕЛСС-3 бескабельными автономными регистраторами SCOUT, расставленными с шагом 8 м (рис.3, а), выбранным из задач исследования и количества оборудования. Кроме того, при проведении работ были сделаны выносные пункты возбуждения, которые позволили получить максимальные удаления ПВ-ПП 424 м.

При обработке результатов малоглубинных сейсморазведочных работ было выявлено, что качество данных, зарегистрированных бескабельной системой SCOUT, существенно ниже, чем телеметрической системой ТЕЛСС-3, вследствие чего было принято решение обрабатывать результаты,

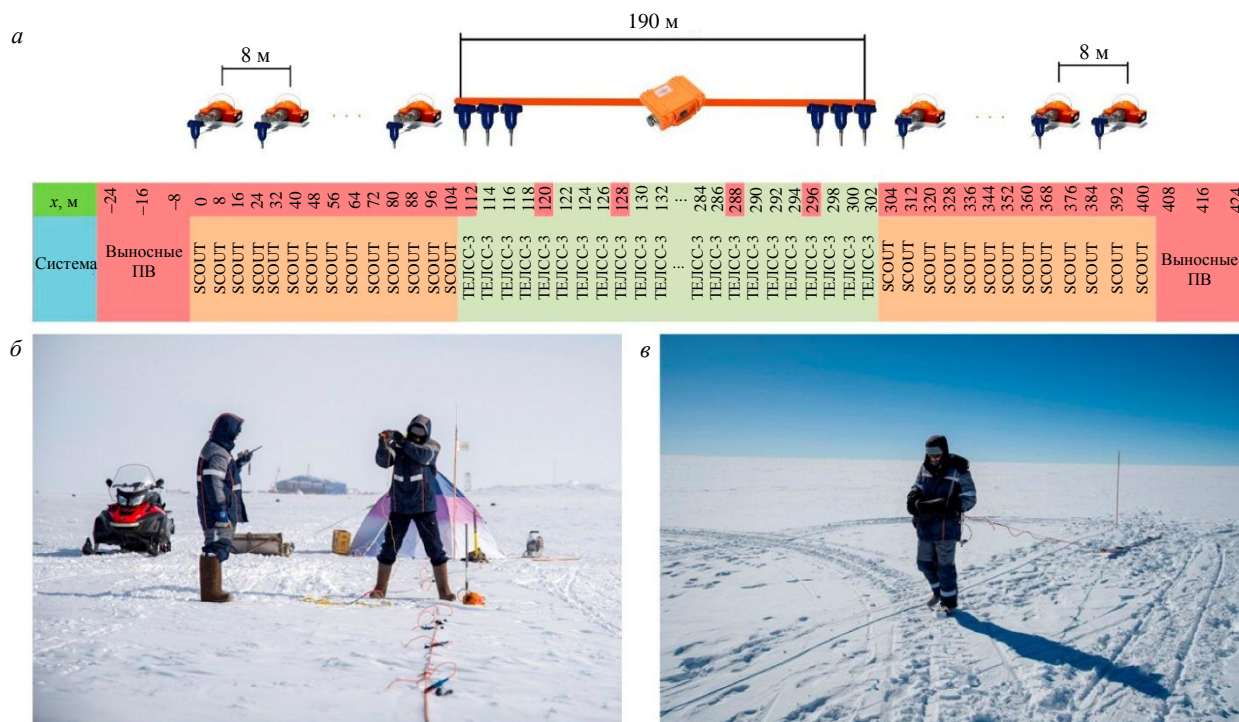


Рис.3. Расположение сейсморегирующих систем на профиле (а), сейсморазведочные (б) и георадиолокационные (в) работы в районе станции Восток



полученные только кабельной сейсмостанцией. Плановая привязка профилей проводилась по спутниковому портативному GPS навигатору Garmin GPSMAP 66 ST (Garmin Ltd., США). Возбуждение упругих колебаний осуществлялось ударом строительной кувалды по металлической плашке (рис.3, б). Синхронизация момента удара со станцией осуществлялась замыканием кувалды и плашки. Оператор сейсмической станции находился в специально оборудованной на профиле палатке, что позволяло работать с сейсморегистрирующей системой в достаточно комфортных условиях в защищенном от ветра месте. На солнце палатка нагревалась, что приводило к повышению в ней температуры относительно окружающего воздуха на 3-5 °С и положительно сказывалось на работе аппаратуры (интерфейс станции ТЕЛСС-3, АКБ, ноутбук).

Дополнительно к сейсморазведочным работам в сезоне 69-й РАЭ на станции Восток были проведены георадиолокационные исследования. Метод георадиолокации основан на явлении отражения электромагнитной волны от неоднородностей геологического разреза, на которых наблюдаются резкие изменения электрических свойств среды – электропроводности и диэлектрической проницаемости. Георадиолокация проводилась на том же профиле, что и сейсмические исследования, с использованием георадара ОКО-2 («ЛогиС», Россия) и антенного блока АБДЛ – Тритон («ЛогиС») с несущей частотой зондирующего импульса 100 МГц (рис.3, в). Привязка георадиолокационного разреза к местности осуществлялась по размеченной на пятиметровые интервалы веревке, натянутой вдоль профиля исследований. В момент, когда центр антенны радара находился напротив метки, оператор ставил на радарограмме электронную метку, что позволяло точно позиционировать полученную радарограмму на профиле.

Колонковое бурение и шурф. Для подтверждения полученных геофизических данных была пробурена скважина VK-24 глубиной 50 м в пункте с координатами 78°28'21" ю.ш., 106°46'56" в.д., в 70 м восточнее взлетно-посадочной полосы, в 1200 м северо-восточнее станции Восток. Место заложения скважины было выбрано на глубинном сейсмическом профиле АВ [6] (см. рис.1) в точке пересечения профилей ПР1 и ПР2, по которым проводились георадиолокационные и малоглубинные сейсмические работы. Буровые работы проводились при помощи буровой установки LGGE (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, Франция) [33]. Керновый материал отбирался в каждом буровом рейсе, заданная рейсовая проходка составляла 0,5 м по кабелю. После бурения снежно-фирновые керны доставлялись в лабораторию бурового комплекса скважины 5Г, где производилась стыковка керна, измерялись его длина, масса, плотность, скорость прохождения ультразвуковой волны, изучались микроструктурные особенности.

Физические свойства СФТ на глубине до 5 м не позволили извлечь керн, качество которого позволяло бы провести его дальнейшее исследование, поэтому в 10 м от скважины VK-24 был выкопан шурф глубиной 5,5 м для изучения приповерхностной части разреза. Рабочая стенка шурфа ориентирована на север. Контроль глубины шурфа осуществлялся по вывешенной вдоль рабочей стенки рулетке.

Исследование керна СФТ, поднятого из неглубокой скважины, и результатов шурфового опробования включало в себя три основных направления: анализ микроструктурных особенностей; измерение плотности; измерение скорости распространения ультразвуковых волн.

Анализ микроструктурных особенностей. Микроструктурные особенности горных пород изучались при исследовании шлифа породы под микроскопом, в лучах проходящего, обычно поляризованного света. В геологии шлифы изготавливаются путем стачивания образца, приклеенного на предметное стекло, на вращающемся механическом диске до получения тонкой пластинки (0,02-0,03 мм) [34]. Клеем служит канадский бальзам, реже другие смолы. В шлифе большая часть минералов становятся прозрачными, что позволяет надежно их диагностировать, опираясь на различные оптические свойства.

Физико-механические свойства фирна не позволяют изготавливать из него достаточно тонкие шлифы. Изучение микроструктурных особенностей СФТ в районе станции Восток производилось в гляциологической лаборатории бурового комплекса скважины 5Г. Из керна выпиливались пластины толщиной 5 мм, подобранной опытным путем. Это минимальная толщина, при которой не происходит разрушение фирна и выпадение из него отдельных частиц. Как правило, для повышения прочностных свойств фирна и изготовления более тонких шлифов образец инфильтруют гидрофобной жидкостью и изготавливают шлиф после ее застывания и дальнейшей сублимации [35, 36].



Проблема данного метода заключается в том, что вязкая жидкость плохо проникает в мелкие поры, количество которых увеличивается с глубиной. В связи с этим изготовление пластин для исследования ограничивалось только пришлифовкой. Таким образом, образцы для исследования можно назвать прозрачными полированными шлифами. Для дальнейшего анализа полученные шлифы примораживались к стеклу. Как правило, при изучении микроструктуры фирновых отложений шаг описания образцов составляет десятки метров [37, 38], в рамках данной работы шлифы исследовались с интервалом 5 м. При описании основное внимание уделялось размеру и форме зерен льда, степени их раскристаллизованности, характеру граней, наличию газовых включений, характеристике межзернового и пустотного пространств. Так как размер ледяных зерен, слагающих верхние горизонты СФТ, меньше 5 мм, для получения более тонких срезов при проведении дальнейших исследований предполагается инфильтрация образца диметилфталатом. Это позволит изготавливать более тонкие прозрачные шлифы для улучшения качества микроструктурного анализа, исследования пространственных межзерновых взаимоотношений и характера пористости.

Измерение плотности. Плотности СФТ в шурфе измерялась при помощи весового снегомера ВС-43. Снегомер устанавливался вблизи верхней грани рабочей стенки шурфа и вращательными движениями внедрялся в массив на всю длину приемной трубы. Затем снегомер с отобранной пробой извлекался из массива, а масса пробы измерялась при помощи встроенной в конструкцию прибора шкалы. Далее замеры повторялись последовательно для нижележащих горизонтов по всей глубине шурфа. Допускаемая погрешность измерения массы пробы ± 5 г.

Плотностное исследование СФТ по керновому материалу производилось путем измерения плотности отдельных кернов. Измерения проводились с глубины 5,5 м, что обусловлено высокой степенью фрагментации кернов с вышележащих горизонтов. Диаметр керна рассчитывался как усредненное значение трех измерений, проводимых штангенциркулем, в различных его частях по всей длине. Погрешность инструментальных измерений, напрямую зависящая от рыхлости фирна, слагающего керна, была установлена в ходе работ, ранее проведенных на станции Восток сотрудниками Арктического и антарктического научно-исследовательского института [23].

Измерение скорости распространения ультразвуковой волны. Измерения проводились при помощи прибора Пульсар-2.2 (НПП «Интерприбор», Россия). Работа прибора основана на измерении времени прохождения ультразвукового импульса с частотой 60 ± 10 кГц в исследуемом материале от индентора-излучателя к индентору-приемнику. Инструментальная погрешность прибора рассчитывается по формуле

$$\gamma = \pm(0,02T + 0,1)k, \quad (2)$$

где T – зарегистрированное прибором значение времени распространения ультразвуковой волны, мс; k – коэффициент, учитывающий температуру окружающей среды (для условий станции Восток $k = 2$).

Инденторы, установленные на единой базе, на расстоянии 120 мм друг относительно друга, образуют датчик поверхностного прозвучивания. Таким образом, скорость ультразвука вычисляется путем деления расстояния между инденторами на измеренное время. Перед началом работы с прибором проводилась его калибровка по контрольному образцу.

В шурфе скорость распространения ультразвука измерялась путем внедрения датчика в рабочую стенку шурфа с усилием 5-10 кг. Прибор был настроен так, что цикл измерений, на основании которого определялось значение скорости ультразвука для исследуемого горизонта, состоял из 15 отдельных замеров скорости и выводился как их среднее арифметическое значение. Замеры проводились с интервалом 25 см по всей глубине шурфа.

Замеры по керновому материалу проводились с интервалом 0,5 м, что соответствует рейсовой проходке. Датчик внедрялся по центру рейсового участка снежно-фирнового керна таким образом, чтобы измерительная база была параллельна оси симметрии керна. Усилие внедрения датчика и методика определения скорости распространения ультразвука были аналогичны тем, что применялись при работе в шурфе.

Результаты измерения плотности фирна и скорости прохождения в нем упругих волн показаны на рис.4. Видно, что указанные физические характеристики увеличиваются с глубиной. Измеренная для скважины VK-24 плотность фирновых отложений коррелирует со значениями, полученными для скважины VK-23 [40] (см. рис.1). При изготовлении шлифов отмечена большая прочность фирна из нижних горизонтов.

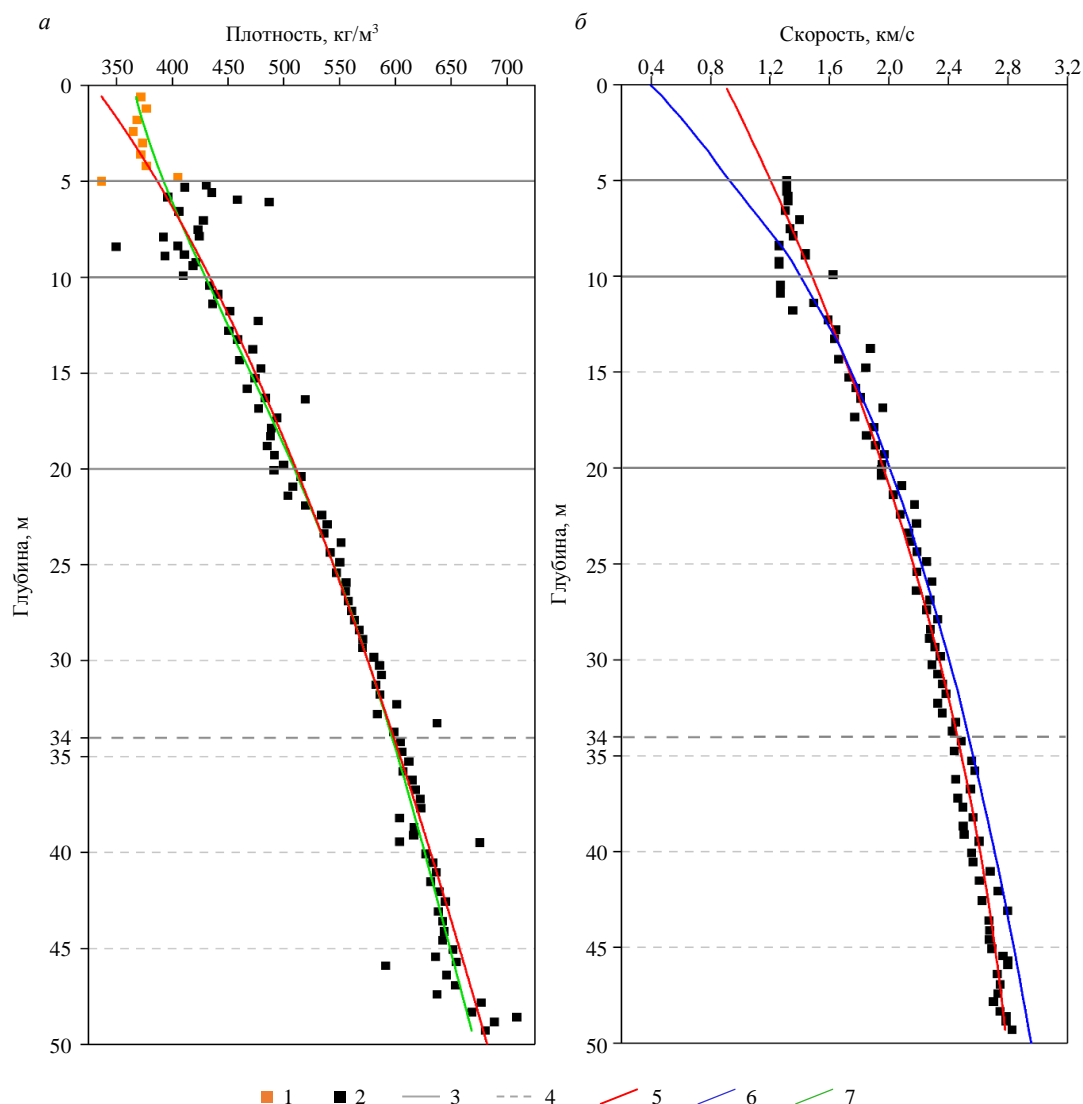


Рис.4. Графики зависимости от глубины плотности фирна (а), скорости распространения ультразвуковых и упругих волн (б)

- 1 – плотность, измеренная в шурфе; 2 – плотность и скорость, измеренные по керну;
3 – достоверные границы между горизонтами; 4 – предполагаемые границы между горизонтами;
5 – линии тренда плотности и скорости ультразвуковых волн;
6 – скорость упругих волн, полученная с глубинно-скоростного разреза;
7 – линия тренда плотности по [23, 39]

Результаты и обсуждение

Геофизические исследования. В качестве примера полевых результатов сейсморазведочных работ приведем две фланговые сейсмограммы (рис.5, а), полученные на профиле работ в районе станции Восток. В результате томографической обработки получен глубинно-скоростной разрез (рис.5, б). Анализ результатов показывает, что скорость продольных волн плавно увеличивается от 450 до 3800 м/с, что говорит о постепенном изменении упругих свойств с глубиной. На глубине 80-90 м скорость достигает значений, характерных для льда, что подтверждается данными о мощности СФТ в районе станции Восток, определенной в ходе предыдущих исследований [22, 40]. В связи с отсутствием контрастных свойств трудно выделить какие-либо границы в изучаемой области, однако характер распределения скоростей упругих волн позволит корректно учесть верхнюю часть разреза при обработке результатов планируемых в дальнейшем глубинных сейсмических работ.

На георадарограмме (рис.6) дифрагированными волнами выделяются отражения от погруженных неоднородностей, которые вследствие близости профилей к взлетно-посадочной полосе носят, скорее всего, антропогенный характер (погребенные под снегом бочки и т.п.). По этим гиперболам были установлены скорость распространения электромагнитной волны (17,5 см/нс) и диэлектрическая проницаемость в среде (2,93). Эти параметры использовались для пересчета

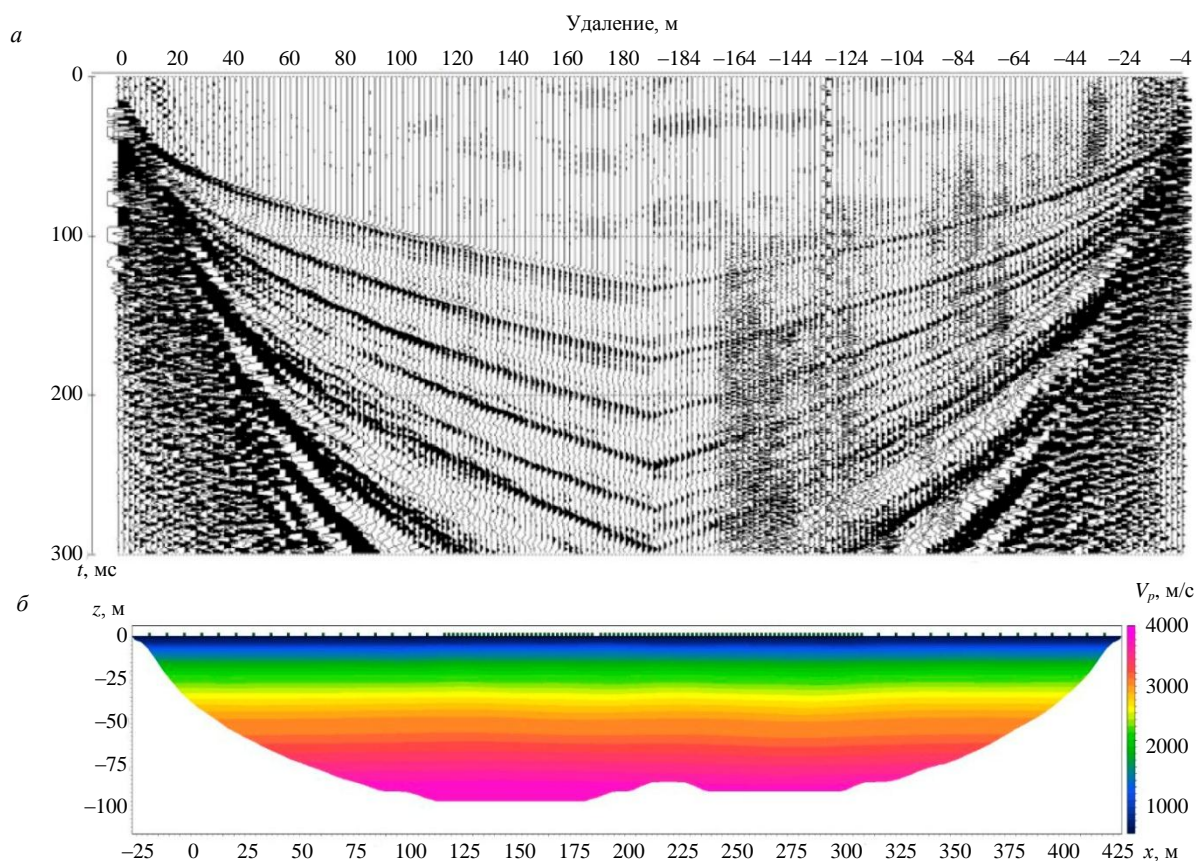


Рис.5. Фланговые полевые сейсмограммы (а) и результат томографической обработки данных полевых работ (б)

временного разреза в глубинный. На разрезе можно выделить два контрастных отражающих горизонта (~325 и ~750 нс), связанных с резкими изменениями в физических свойствах СФТ. Ниже глубины 80-90 м теряется когерентность сигнала, что может свидетельствовать о плавном переходе из СФТ в лед и согласуется с результатами сейсмических работ.

Микроструктура и физические свойства СФТ. На проходку скважины было затрачено 27 ч 55 мин, выполнено 100 буровых рейсов, глубина скважины по керну составила 49,28 м, с глубины 5,5 м выход керна 100 %. На копание шурфа было затрачено 8 ч, габаритные размеры шурфа 5×5×5,5 м.

Исследование микроструктуры фирновых отложений было выполнено для 10 кернов с интервалом в 5 м (рис.7).

Полученные результаты показывают, что с глубиной размер зерен льда в фирновых отложениях увеличивается от долей миллиметра до монокристаллов размером до 5 мм. Вместе с этим в шлифах отмечается рост процентного содержания зерен более крупных фракций, что может быть обусловлено процессами перекристаллизации под действием направленного стресса и с течением времени [41], в результате паратектонической режеляционной перекристаллизации [42]. Так, в шлифе с глубины 5,5 м пустотное пространство между изометричными кристаллами размером 1-1,5 мм выполнено мелкими зернами игольчатой и шестоватой формы, длина которых не превышает 0,2 мм (рис.6). При этом зерна данной группы формируют до 50 % от общего объема породы. С глубиной их количество постепенно сокращается, едва достигая 10 %, а на глубине свыше 40 м они срastaются, отмечается более однородный облик фирна.

Опираясь на изученные микроструктурные особенности и физические свойства СФТ, выполнено расчленение стратиграфического разреза приповерхностной части Антарктического ледникового щита в районе станции Восток. Выделено пять горизонтов в интервалах глубин 0-5, 5-10, 10-20, 20-34(?), 34(?)-50 м. При этом границы между различными горизонтами представлены постепенными переходами, что отражается на результатах сейсмических работ (см. рис.4, б, 5, б). Рассмотрим каждый из выделенных горизонтов (интервал глубин по керну).

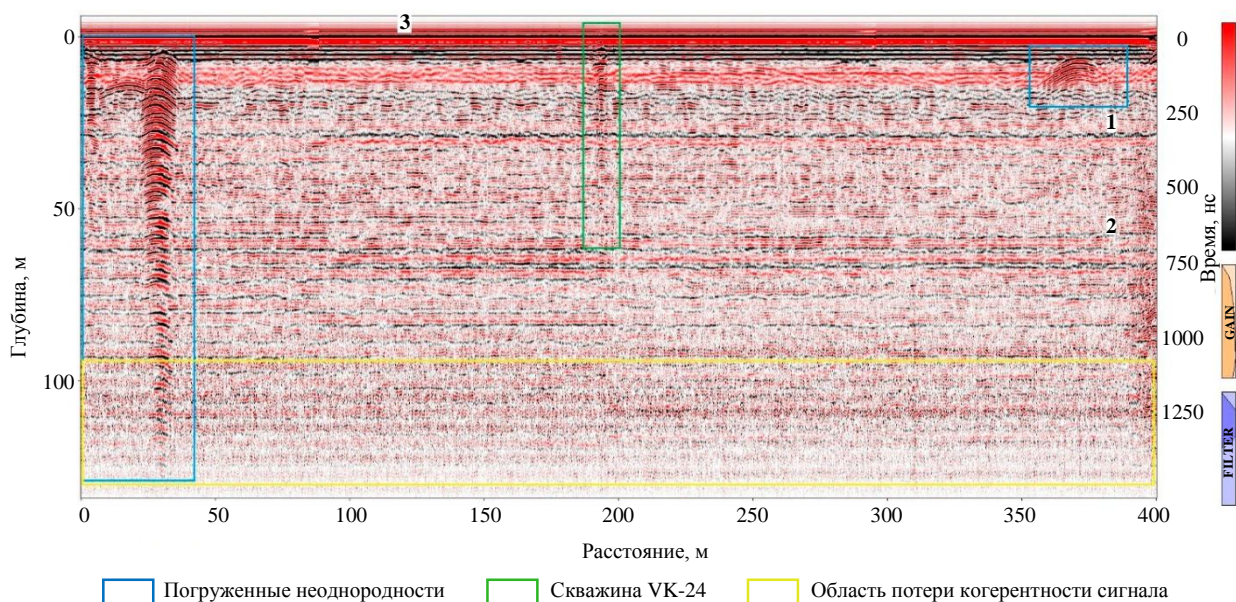


Рис.6. Георадарограмма района станции Восток с антенным блоком Тритон

1, 2 – отражающие горизонты; 3 – прямая волна

• Интервал 0-5 м. Рыхлые снежно-фирновые образования с прослоями плотных радиационных корок, которые были изучены в шурфе VK-24. Плотность данного горизонта в среднем составляет 375 кг/м^3 , при этом у нижней границы значения превышают 400 кг/м^3 (см. рис.4, а). Скорость прохождения ультразвуковых волн для данного интервала незначительно возрастает на глубинах 0-2 м, затем значения практически не изменяются, в среднем составляя 1300 м/с . После обработки результатов сейсмических работ и ультразвуковых исследований обнаружено, что полученные в ходе последних замеров скорости отличались большими значениями. Это может быть связано с тем, что используемый при измерениях прибор Пульсар 2.2 не позволяет измерять скорость, величина которой меньше 1000 м/с вследствие того, что происходит замыкание сигнала, проходящего между инденторами, через ручку прибора. С отсутствием кондиционных результатов измерений скорости в описываемом интервале, очевидно, связано и завышение значений линии тренда по сравнению с результатами сейсморазведочных работ (см. рис.4, б).

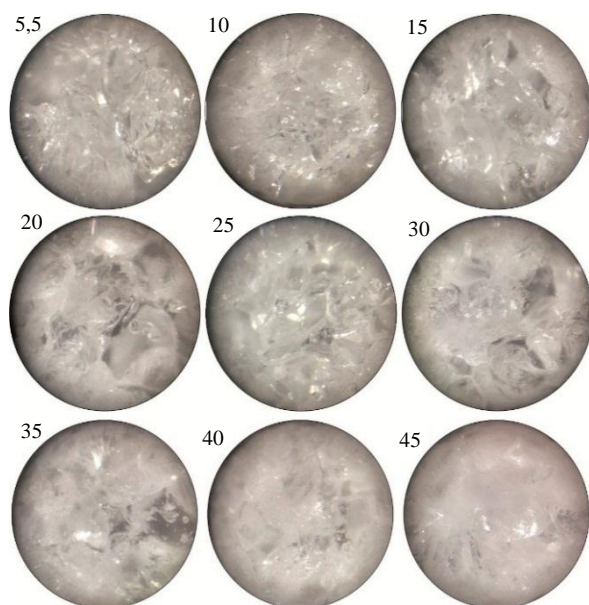


Рис.7. Микрофотографии фирновых отложений, поднятых из скважины VK-24. Цифрами указана глубина в метрах. Размер поля зрения 10 мм

Нижняя граница проведена на глубине 5 м на основании скачкообразного роста плотности и выносе из скважины более твердого керна с нижележащих интервалов. В интервале 0-5 м керн выходил фрагментами, с глубины 5,5 м и более целиком. Мощность горизонта $\approx 5 \text{ м}$.

• Интервал 5-10 м. По результатам анализа микроструктурных особенностей представлен мелкозернистым фирном, состоящим из зерен разного размера, которые условно можно разделить на две группы. Большая часть породы (60 % от общего объема) сложена угловатыми и слабоокругленными зернами изометричной или таблитчатой формы, средний размер которых составляет 1-1,5 мм (рис.7). Вторая группа представлена индивидами игольчатой и шестоватой формы размером до 0,2 мм по вытянутому сечению, которые заполняют пустоты между более крупными зернами. Керн из верхней части рассматриваемого горизонта (интервал 5-6 м) выходил фрагментарно. Кусочки, размер которых



мог не превышать 10 см, зачастую имели неправильную форму. Это затрудняло измерение их диаметра и длины и вызвало аномально высокие значения плотности у верхней границы. При этом средние значения плотности для мелкозернистого фирна составляют 425 кг/м^3 . Среднее значение скорости прохождения ультразвуковой волны – 1350 м/с . Нижняя граница горизонта может быть проведена в интервале 10-12 м, основываясь на анализе физических свойств. Как было отмечено выше, характер смены криологических разностей постепенный и плавный. В то же время результаты изучения керна, поднятого из соседней скважины VK-23 [40], позволяют выделить подошву горизонта на глубине 10 м по наличию в шлифах нижележащих отложений агрегатов зерен размером до 5 мм, не встреченных ранее. Аналогичные агрегаты отмечены в скважине VK-24 на глубинах 15 м и ниже (рис.7). Мощность горизонта $\approx 5 \text{ м}$.

- Интервал 10-20 м. Мелко-среднезернистый фирн сложен гетерогенной массой, состоящей из зерен двух групп. Первая представлена индивидами со средним размером 1,2 мм (60 % от объема породы) изометричной или таблитчатой формы, отмечаются сросшиеся агрегаты от 2-2,5 до 5 мм (30 %), которые формируют тесные срастания и агрегаты. Межзерновое пространство заполнено мелкими индивидами удлиненной формы (до 1 мм). В наиболее крупных агрегатах фиксируются газовые включения. Плотность пород изменяется от 440 до 500 кг/м^3 у нижней границы горизонта. На графике скорости прохождения упругих волн (см. рис.2) отмечается рост градиента, при этом значения у нижней границы достигают 2000 м/с , что может свидетельствовать о резком уменьшении площади открытых пор и более плотной упаковке кристаллов. Нижняя граница проведена по наличию структур бластеза в нижележащих горизонтах и на основании изменения физических свойств. Мощность горизонта $\approx 10 \text{ м}$.

- Интервал 20-34 м. Фирн среднезернистый, состоящий из неоднородной массы, выполненной зернами разного размера. Более 70 % породы выполнено хорошо раскристаллизованными идиоморфными зернами изометричной формы со средним размером 3-3,5 мм. Грани различимы слабо, поэтому наиболее крупные зерна, размер которых достигает 5-6 мм, могут являться агрегатами и формировать бластовые структуры, напоминающие пчелиные соты. Вторая группа представлена зернами $\sim 1 \text{ мм}$. Они раскристаллизованы значительно хуже, грани неровные. Встречаются удлиненные кристаллы, выполняющие межзерновое пространство (до 10 % от объема породы) длиной 0,5 мм. В рассматриваемом горизонте отмечается равномерный устойчивый рост плотности и скорости прохождения ультразвуковых волн, равных $500-600 \text{ кг/м}^3$ и $2000-2500 \text{ м/с}$, соответственно. Мощность горизонта $\approx 14 \text{ м}$.



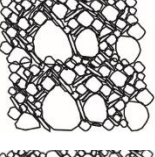
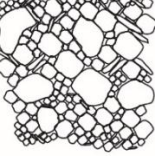
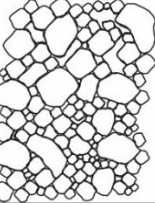
- Интервал 34-50 м. На глубине 34 м условно проведена нижняя граница среднезернистого фирна. Это обусловлено тем, что с глубины 35 м в породе начинают преобладать зерна, размер которых превышает 4 мм. Наблюдается увеличение прочностных характеристик фирна, это выражается в его меньшей подверженности шлифовке. При шлифовании отпиленной из керна пластины она покрывалась мелкой пылью, что значительно уменьшало прозрачность шлифа (рис.7). Значения плотности и скорости прохождения ультразвуковой волны с глубины 34 м превышают 600 кг/м^3 и 2500 м/с , соответственно. Таким образом, интервал сложен среднезернистым фирном с зернами двух фракций. К первой относятся идиоморфные кристаллы изометричной и таблитчатой формы размером 4 мм и более, ко второй – агрегаты неправильной, ксеноморфной формы с неровными и причудливо изогнутыми гранями, сформированные из удлиненных кристаллов, выполняющих в вышележащих интервалах межзерновое пространство.

Обобщенная характеристика каждого из выделенных интервалов глубин представлена в таблице.

Отметим хорошую сходимости результатов исследований по керну с результатами геофизических в особенности сейсмических работ. Полученный стратиграфический разрез (структурно-вещественный состав выделенных горизонтов СФТ, их границы) значимо коррелирует с разрезом по скважине VK-23, расположенной в 1,5 км (см. рис.1) [40]. Результаты рассчитанной плотности снежно-фирновых отложений также очень схожи с результатами работ [23, 39] (см. рис.4, а). Приведенные плотностные характеристики для выделенных в результате микроструктурного анализа горизонтов совпадают, особенно надежно это прослеживается для данных, полученных по керну.



Уточненный схематический стратиграфический разрез приповерхностной части ледникового щита Антарктиды в районе станции Восток

Глубина, м	Литологическая колонка	Мощность, м	Характеристика подразделений
5		5	Рыхлые снежно-фирновые отложениями с прослоями плотных радиационных коробок
10		5	Мелкозернистый фирн, сложенный изометричными (1-1,5 мм) и игольчатыми (до 0,2 мм) зернами, выполняющими пустоты
15		10	Мелко-среднезернистый фирн, сложенный гетерогенной массой. Большая часть породы – изометричные зерна (1,2 мм) и агрегаты (до 5 мм). Вторая группа – индивиды удлиненной формы (до 1 мм)
20		14?	Среднезернистый фирн, сложенный идиоморфными изометричными зернами, формирующими структуру бластеза (3-6 мм), и мелкими зернами (1 мм)
30		>16	Средне-крупнозернистый фирн, выполненный индивидами размером более 4 мм
40			
50			

Рассматривая полученные сходства с известными результатами, отметим различия в значениях, полученных по положению границы снег-фирн, которая ранее выделялась на глубине 22,7 м. Набор характерных структурных особенностей в верхней части СФТ (5-20 м), определенных в рамках данного исследования, в частности наличие изометричных зерен, пористых гранобластовых структур, интерсертальных включений воздуха, а также измеренные значения плотности, попадающие в диапазон от 0,49 до 0,80 г/см³, позволяют отнести данные образования к фирну [42]. Это также подтверждается разрезом по скважине ВК-23 [40]. В то же время выделяемую ранее границу на глубине 22,7 м [10, 23, 39], рассчитанную экспериментально, предлагается рассмотреть в качестве зоны перехода от мелкозернистого фирна к среднезернистому. Для подтверждения данной гипотезы предполагается проведение более детального микроструктурного анализа с уменьшением интервала описания кернов до 0,5 м.

Заключение

В приповерхностной части разреза Антарктического ледникового щита в районе станции Восток выделено пять горизонтов СФТ, характеризующихся различными микроструктурными особенностями и физическими свойствами. Положение геологических границ на глубинах 5; 10; 20; 34 м частично подтверждается результатами проведенных сейсмических и георадиолокационных работ (для границы 34 м), на указанных интервалах отмечается изменение градиента скорости упругих волн. Границы на глубинах 5; 10; 20 м не выделяются при использовании АБДЛ – Тритон, для корректного отображения требуется использование более высокочастотных антенн.

Полученные актуальные данные о строении СФТ в районе станции Восток будут использованы для планирования и разработки методики и техники буровых работ при проведении глубинных сейсмических исследований, направленных на изучение нижних горизонтов ледника, а также мощности, морфологии и состава донных отложений озера Восток для выбора точки заложения скважины. Изучение консолидированного фундамента озера Восток и получение сведений об особенностях его строения даст возможность определить геодинамические обстановки формирования данной структуры [43].



Проведенные исследования определения скорости прохождения ультразвука через керновый материал показали достаточную сходимость с результатами сейсморазведочных работ с глубины 5 м. Расхождение результатов измерений в приповерхностной части СФТ связано с ее физическими характеристиками и конструктивными особенностями прибора Пульсар 2.2. Верхние горизонты СФТ характеризуются меньшей плотностью, большими хрупкостью и объемом открытых пор, что в большей степени сказывается на измерениях скорости по керну после механического воздействия на породы в процессе бурения, чем измерения на образцах с нижележащих горизонтов. При внедрении индентеров могут происходить локальные деформации керна, негативно влияющие на результаты измерений. В дальнейшем при проведении данного вида исследований планируется увеличить количество измерений в одном интервале. Полученные результаты будут использованы при изучении физико-механических свойств ледника по керновому материалу неразрушающими методами.

Анализ микроструктурных особенностей строения СФТ по керновому материалу предполагает инфильтрации шлифа жидкостью, например, диметилфталатом, после ее застывания и дальнейшей сублимации. Это позволит изготовить более тонкие и прозрачные шлифы без разрушения целостности образца, что, в свою очередь, даст возможность оценить пористость СФТ и улучшит результаты микроструктурного анализа.

Коллектив авторов выражает благодарность участникам Российской антарктической экспедиции за содействие в проведении научно-исследовательских работ, В.Н.Заровчатскому и И.И.Лаврентьеву за помощь в организации полевых работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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)
2. Morlighem M., Rignot E., Binder T. et al. Deep glacial troughs and stabilizing ridges unveiled beneath the margins of the Antarctic ice sheet // Nature Geoscience. 2020. Vol. 13. № 2. P. 132-137. DOI: [10.1038/s41561-019-0510-8](https://doi.org/10.1038/s41561-019-0510-8)
3. 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. № 2. P. 106-124. DOI: [10.1038/s43017-021-00246-9](https://doi.org/10.1038/s43017-021-00246-9)
4. Frémand A.C., Fretwell P., Bodart J.A. et al. Antarctic Bedmap data: Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable (FAIR) sharing of 60 years of ice bed, surface, and thickness data // Earth System Science Data. 2023. Vol. 15. Iss. 7. P. 2695-2710. DOI: [10.5194/essd-15-2695-2023](https://doi.org/10.5194/essd-15-2695-2023)
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. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков 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)
7. 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](https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.125556)
8. Сербин Д.В., Дмитриев А.Н. Экспериментальные исследования теплового способа бурения плавлением скважины в ледовом массиве с одновременным контролируемым расширением ее диаметра // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 833-842. DOI: [10.31897/PMI.2022.82](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.82)
9. 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)
10. Salamatina A.N., Lipenkov V.Ya., Barnola J.M. et al. Snow/Firn Densification in Polar Ice Sheets // Low Temperature Science. 2009. Vol. 68 (Suppl. Iss.). P. 195-222.
11. Salamatina A.N., Lipenkov V.Ya., Barnola J.M. et al. Basic approaches to dry snow-firn densification modeling // Материалы гляциологических исследований. 2006. Вып. 101. С. 3-16 (in English).
12. Salamatina A.N., Lipenkov V.Ya. Simple relations for the close-off depth and age in dry-snow densification // Annals of Glaciology. 2008. Vol. 49. P. 71-76. DOI: [10.3189/172756408787814889](https://doi.org/10.3189/172756408787814889)
13. Gascon G., Sharp M., Burgess D. et al. How well is firn densification represented by a physically based multilayer model? Model evaluation for Devon Ice Cap, Nunavut, Canada // Journal of Glaciology. 2014. Vol. 60. № 222. P. 694-704. DOI: [10.3189/2014JG13J209](https://doi.org/10.3189/2014JG13J209)
14. Alley R.B. Firn densification by grain-boundary sliding: a first model // Journal de Physique Colloques. 1987. Vol. 48. № C1. P. 249-254. DOI: [10.1051/jphyscol:1987135](https://doi.org/10.1051/jphyscol:1987135)
15. Alley R.B. Flow-law hypotheses for ice-sheet modeling // Journal of Glaciology. 1992. Vol. 38. № 129. P. 245-256. DOI: [10.3189/S0022143000003658](https://doi.org/10.3189/S0022143000003658)
16. Davis R.E., Arons E.M., Albert M.R. Metamorphism of Polar Firn: Significance of Microstructure in Energy, Mass and Chemical Species Transfer // Chemical Exchange Between the Atmosphere and Polar Snow. Springer, 1996. Vol. 43. P. 379-401. DOI: [10.1007/978-3-642-61171-1_17](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61171-1_17)
17. Alley R.B., Woods G.A. Impurity influence on normal grain growth in the GISP2 ice core, Greenland // Journal of Glaciology. 1996. Vol. 42. № 141. P. 255-260. DOI: [10.3189/S0022143000004111](https://doi.org/10.3189/S0022143000004111)
18. Cuffey K.M., Thorsteinsson T., Waddington E.D. A renewed argument for crystal size control of ice sheet strain rates // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2000. Vol. 105. № B12. P. 27889-27894. DOI: [10.1029/2000JB900270](https://doi.org/10.1029/2000JB900270)



19. Сербин Д.В., Дмитриев А.Н., Васильев Н.И. Устройство для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением скважин во льду // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 3. С. 333-343. DOI: [10.21285/2686-9993-2021-44-3-333-343](https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-333-343)
20. Сербин Д.В. Предотвращение образования эмульсии при вскрытии подледниковых водоемов // Известия Уральского государственного горного университета. 2021. Вып. 3 (63). С. 80-88. DOI: [10.21440/2307-2091-2021-3-80-88](https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-3-80-88)
21. Kadochnikov V.G., Dvoynikov M.V. Development of Technology for Hydromechanical Breakdown of Mud Plugs and Improvement of Well Cleaning by Controlled Buckling of the Drill String // Applied Science. 2022. Vol. 12. Iss. 13. № 6460. DOI: [10.3390/app12136460](https://doi.org/10.3390/app12136460)
22. Veres A.N., Ekaykin A.A., Golobokova L.P. et al. A record of volcanic eruptions over the past 2,200 years from Vostok firm cores, central East Antarctica // Frontiers in Earth Science. 2023. Vol. 11. № 1075739. DOI: [10.3389/feart.2023.1075739](https://doi.org/10.3389/feart.2023.1075739)
23. Экайкин А.А., Чихачев К.Б., Верес А.Н. и др. Профиль плотности снежно-фирновой толши 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)
24. Верес А.Н., Экайкин 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 ядра // 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)
25. Пащенко Ф.А., Харьков Н.С., Сидоренко А.А., Гарбузов В.В. Уплотнение снежного основания зимовочного комплекса станции «Восток» // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 3. С. 285-301. DOI: [10.22363/1815-5235-2023-19-3-285-301](https://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-3-285-301)
26. Banfi F., De Michele C. A local model of snow-firm dynamics and application to the Colle Gnifetti site // The Cryosphere. 2022. Vol. 16. Iss. 3. P. 1031-1056. DOI: [10.5194/tc-16-1031-2022](https://doi.org/10.5194/tc-16-1031-2022)
27. Sayers C.M. Porosity dependence of elastic moduli of snow and firm // Journal of Glaciology. 2021. Vol. 67. № 265. P. 788-796. DOI: [10.1017/jog.2021.25](https://doi.org/10.1017/jog.2021.25)
28. Thomas E.R., Vladimirova D.O., Tetzner D.R. et al. Ice core chemistry database: an Antarctic compilation of sodium and sulfate records spanning the past 2000 years // Earth System Science Data. 2022. Vol. 15. Iss. 6. P. 2517-2532. DOI: [10.5194/essd-15-2517-2023](https://doi.org/10.5194/essd-15-2517-2023)
29. Steig E.J., Fischer H., Fisher D. et al. White paper: The IPICS 2k Array: a network of ice core climate and climate forcing records for the last two millennia // International Partnerships in Ice Core Sciences. 2006. 4 p.
30. Kohnen H. On the Relation between Seismic Velocities and Density in Firm and Ice // Zeitschrift für Geophysik. 1972. Band 38. Heft 1. P. 925-935.
31. Picotti S., Carcione J.M., Pavan M. Seismic attenuation in Antarctic firm // The Cryosphere. 2024. Vol. 18. Iss. 1. P. 169-186. DOI: [10.5194/tc-18-169-2024](https://doi.org/10.5194/tc-18-169-2024)
32. Масолов В.Н., Лукин В.В., Шереметьев А.Н., Попов С.В. Геофизические исследования подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде // Доклады Академии наук. 2001. Т. 379. № 5. С. 680-685.
33. Gillet F., Donnou D., Girard C. et al. Ice core quality in electromechanical drilling // Proceedings of the Second International Workshop/Symposium on Ice Drilling Technology, 30-31 August 1982, Calgary, AB, Canada. Hanover: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1984. CRREL Special Report 84-34. P. 73-80.
34. Sirotkin A.N., Talovina I.V., Duryagina 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)
35. Iliescu D., Baker I., Hui Chang. Determining the orientations of ice crystals using electron backscatter patterns // Microscopy Research and Technique. 2004. Vol. 63. Iss. 4. P. 183-187. DOI: [10.1002/jemt.20029](https://doi.org/10.1002/jemt.20029)
36. Iliescu D., Baker I., Daghlani C.P. Orientation Mapping in Polycrystalline Ice Using Electron Backscatter Patterns // Microscopy and Microanalysis. 2005. Vol. 11. Suppl. 2. P.1500-1501. DOI: [10.1017/S1431927605505452](https://doi.org/10.1017/S1431927605505452)
37. Baker I., Obbard R., Iliescu D., Meese D. Microstructural characterization of firm // Hydrological Processes. 2007. Vol. 21. Iss. 12. P. 1624-1629. DOI: [10.1002/hyp.6725](https://doi.org/10.1002/hyp.6725)
38. Липенков В.Я., Полякова Е.В., Экайкин А.А. Закономерности формирования конжеляционного льда над подледниковым озером Восток // Лед и Снег. 2012. Т. 52. № 4. С. 65-77. DOI: [10.15356/2076-6734-2012-4-65-77](https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-4-65-77)
39. Lipenkov V.Ya., Salamatina A.N., Duval P. Bubbly-ice densification in ice sheets: II. Applications // Journal of Glaciology. 1997. Vol. 43. № 145. P. 397-407. DOI: [10.3189/S0022143000034973](https://doi.org/10.3189/S0022143000034973)
40. Большунов А.В., Васильев Д.А., Дмитриев А.Н. и др. Результаты комплексных экспериментальных исследований на станции Восток в Антарктиде // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 724-741.
41. Abdrakhmanov I.A., Gulbin Y.L., Skublov S.G., Galankina O.L. Mineralogical Constraints on the Pressure-Temperature Evolution of Granulites in the Bunge Hills, East Antarctica // Minerals. 2024. Vol. 14. Iss. 5. № 488. DOI: [10.3390/min14050488](https://doi.org/10.3390/min14050488)
42. Шумский П.А. Основы структурного ледоведения. Петрография пресного льда как метод гляциологического исследования. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1955. 492 с.
43. Litvinenko V., Trushko V. Modelling of geomchanical processes of interaction of the ice cover with subglacial Lake Vostok in Antarctica // Antarctic Science. 2025. Vol. 37. P. 39-48. DOI: [10.1017/S0954102024000506](https://doi.org/10.1017/S0954102024000506)

Авторы: Алексей Викторович Большунов, канд. техн. наук, научный руководитель лаборатории, <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), Глеб Дмитриевич Горелик, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-9890-5275> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Никита Сергеевич Крикун, ведущий инженер, <https://orcid.org/0000-0003-0350-4987> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Дмитрий Александрович Васильев, канд. техн. наук, ассистент, Vasilev_DA@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8132-8881> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Илья Витальевич Ракитин, аспирант, <https://orcid.org/0000-0002-7874-1859> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Вячеслав Сергеевич Шадрин, аспирант, <https://orcid.org/0009-0002-2329-3435> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.