

Прикладные проблемы

УДК 551.324.85

DOI: 10.31857/S2076673422030142, EDN: EQTCOZ

Применение метода георадиолокации для обеспечения безопасности логистических операций в районе станции Русская в Западной Антарктиде

© 2022 г. А.А. Суханова^{1*}, В.В. Харитонов², С.В. Попов^{3,1}, М.П. Кашкевич¹¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;²Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия;³Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург, Россия

*suhanova.anastassiya@yandex.ru

The application of the GPR-method for safety of logistics operations near the Russkaya station in West Antarctica

A.A. Sukhanova^{1*}, V.V. Kharitonov², S.V. Popov^{3,1}, M.P. Kashkevich¹¹Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;²Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia;³Polar Marine Exploration Expedition, St. Petersburg, Russia

*suhanova.anastassiya@yandex.ru

Received February 2, 2022 / Revised April 26, 2022 / Accepted July 11, 2022

Keywords: GPR-method, ice crevasses, logistics operations, runway, Russkaya station, West Antarctica.

Summary

The Russkaya station (Marie Byrd Land, West Antarctica) was one of the wintering stations of the Russian Antarctic Expedition (RAE) before its conservation in 1990. Starting from the field season of the 65th RAE (2019/20), work is under way at Russkaya station to put it into operation as a functioning wintering station. Due to its significant distance from other RAE infrastructure sites and also due to severe climate, organization of logistical operations in this area requires a special approach. For the most effective transport communication with the station, it is planned to organize an airstrip to receive planes on ski landing gear on the surface of the outlet glacier. Glaciers of this type are often characterized by crevasses, which are not traceable on the surface, which makes it necessary to study the structural sub-surface features of the glacier. For this purpose, geophysical survey in the field season of the 65th RAE were carried out with usage of the GPR-method. GPR profiling at a frequency of 900 MHz allowed us to identify the crevasses and assess their morphometric characteristics, in particular the width and depth. The widest crevasses were examined in detail to improve the interpretation of GPR data. Based on the results of geophysical works, the boundaries of zones were determined, within which the crevasses are either absent, or their width does not exceed 0.6 m. In addition, by means of core drilling, values of ice density to a depth of 5 m from the surface were obtained, which correspond to the normative data on preparation of airfields for operation of airplanes on ski landing gear. Based on the results of geophysical and glaciological investigations, a site on the glacier suitable for runway preparation was identified. An area safe for organization of transport communication between the airfield and Russkaya station was also identified. It is adjacent to the hills of the oasis, as the glacier in this part is the most stationary.

Citation: Sukhanova A.A., Kharitonov V.V., Popov S.V., Kashkevich M.P. The application of the GPR-method for safety of logistics operations near the Russkaya station in West Antarctica. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2022, 62 (3): 427–440. [In Russian].
doi: 10.31857/S2076673422030142, edn: eqtcoz.

Поступила 2 февраля 2022 г. / После доработки 12 апреля 2022 г. / Принята к печати 11 июля 2022 г.

Ключевые слова: георадиолокация, ледниковые трещины, логистические операции, взлётно-посадочная полоса, станция Русская, Западная Антарктида.

Представлены результаты исследований, выполненных на участке ледника в районе станции Русская в рамках сезонных работ 65-й РАЭ (2019/20 г.). Проведена георадарная съёмка с целью выявления трещин в ледниковом массиве, что позволило определить безопасную зону при организации взлётно-посадочной полосы для приёма самолётов на лыжном шасси.

Введение

Станция Русская – одна из шести российских антарктических станций на Антарктическом побережье. Она расположена в Западной Антарктиде на территории Земли Мэри Бэрд на мысе Беркс в стратегически важном тихоокеанском секторе и значительно удалена от других отечественных станций и полевых баз. Её история берёт своё начало с 1972 г., когда в ходе работ 17-й Советской антарктической экспедиции (САЭ) были проведены рекогносцировочные исследования для поиска подходящего места для организации новой станции, а уже в 1980 г., в рамках полевого сезона 26-й САЭ (1980/81 г.) Русская была введена в эксплуатацию в качестве зимовочной станции (Дубровин, Козловский, 1991).

Расположение станции Русская во многом обуславливает отличительную климатическую черту мыса Беркс, а именно: образование здесь продолжительных, нередко ураганных ветров со скоростью свыше 60 м/с (Дубровин, Козловский, 1991; Саватюгин, 2001). Кроме того, район её расположения характеризуется сложными ледовыми условиями (Саватюгин, 2001), что неблагоприятно влияет на проведение судовых операций. Перечисленные особенности климата напрямую влияют на организацию процессов жизнеобеспечения станции Русская. В частности, именно в результате ураганных ветров в сезон 35-й САЭ (1989/90 г.) в ночь с 8 на 9 марта 1990 г. часть припайного льда была разрушена, что повлекло за собой потерю продовольственных и технических грузов, необходимых для снабжения станции. Это стало причиной приостановки работ с дальнейшей её консервацией 16 марта 1990 г. (Саватюгин, 2001). В ходе последующих экспедиций, в частности, в рамках работ 38-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) в 1992/93 г. проводили единичные рекогносцировочные полёты для осмотра состояния станции.

Начиная с полевого сезона 65-й РАЭ (2019/20 г.) в районе станции Русская выполняются работы по её расконсервации и введению в эксплуатацию в качестве действующей зимовочной станции. Кроме проведения полномасштабных работ по ремонту строений, большое внимание уделяется обеспечению транспортных операций в пределах самой станции и близлежащих территорий: организации взлётно-посадочной полосы (ВПП) на

участке ледника для приёма самолётов на лыжном шасси, а также исследованию трассы, соединяющей ВПП со станцией. Необходимость наличия посадочной площадки обусловлена удалённостью станции от основных районов работ РАЭ, поэтому для завоза сезонного и зимовочного состава экономически целесообразно именно авиационное сообщение. Организация ВПП и сопровождающие её работы по обеспечению безопасности транспортных операций имеют важное значение для инфраструктуры в районе станции Русская.

Актуальность выполненных исследований

Обеспечение безопасности транспортных операций напрямую связано с расположением логистических пунктов вблизи выводящих континентальных и шельфовых ледников, широко развитых в прибрежной части Антарктиды (Войтковский, 1999). Они характеризуются значительными скоростями движения, что приводит к образованию многочисленных и весьма обширных систем трещин. За счёт аккумуляции снежных осадков трещины часто не прослеживаются на ледниковой поверхности, что нередко становилось причиной аварий при попадании в них станционного транспорта (Попов, Поляков, 2016). Именно поэтому крайне важно своевременное, а также дистанционное выявление опасных трещин в теле ледника. С этой целью в рамках исследований в Антарктиде выполняют геофизические работы методом георадиолокации.

Успешный опыт применения георадарной съёмки для выявления трещин отражён в работах зарубежных специалистов с начала 2000-х годов при исследованиях покровных ледников Антарктиды (Arcone, Delaney, 2000; Koh et al., 2010; Nath, Vaughan, 2003; Taurisano et al., 2006) и горных ледников (Eder et al., 2008; Zamora et al., 2005). В рамках работ РАЭ метод георадиолокации для поиска трещин стал наиболее популярен с 2013 г., когда на основании геофизических работ в полевой сезон 58-й РАЭ (2012/13 г.) были установлены возможности георадаров для определения неоднородностей в теле ледника (Попов и др., 2015; Попов, Эберляйн, 2014).

Один из важных примеров георадарных работ для выявления опасных трещин – исследования вблизи станции Мирный в период се-

Методика исследований

зонных работ 59–61-й РАЭ (2013–2016 гг.), в результате которых на безопасном участке ледника была организована и введена в эксплуатацию посадочная площадка для самолётов на лыжном шасси (Попов и др., 2016). С сезона 63-й РАЭ (2017/18 г.) для обеспечения безопасности транспортных операций геофизические работы проводят в районе станции Прогресс. Выполненные георадарные исследования позволили организовать трассу, проходящую по участку ледника и соединяющую станцию Прогресс с аэродромом (Суханова и др., 2020). Подготовлена также площадка для склада хранения топлива (Киньябаева и др., 2020) и обследован на предмет наличия трещин участок ледника, в пределах которого разгружаются научно-экспедиционные суда (Григорьева и др., 2019). Всё это позволяет сделать вывод об эффективности метода георадиолокации как способа определения опасных разрывных нарушений при изучении ледников.

Постановка цели и задачи исследований

Для обеспечения безопасности в процессе сезонных работ 65-й РАЭ вблизи станции Русская гляциогеофизическим отрядом были выполнены исследования на участке выводного ледника. Комплекс работ предусматривал георадарную съёмку и гляциологические исследования с помощью механического бурения и отбора кернов. В процессе геофизических работ предполагалось изучение структурных особенностей ледниковой толщи в приповерхностной её части с последующим выявлением трещин на участке исследований и оценкой степени их опасности. При выполнении гляциологических работ необходимы были буровые работы в пределах участков выявленных трещин для уточнения результатов интерпретации георадарных данных, а также отбор кернов для изучения плотностных характеристик и особенностей строения приповерхностной части ледника. Дополнительные исследования предполагали выполнение геодезических измерений вдоль продольных и поперечных геофизических маршрутов в пределах участка организации ВПП, которые проводили для получения абсолютных высот по маршрутам. Полученные результаты в дальнейшем были использованы при интерпретации георадарных данных.

Организация взлётно-посадочной полосы в районе станции Русская предполагалась на участке ледника, где располагался действующий аэродром до консервации станции в 1990 г. В 59-ю РАЭ (2013/14 г.) сотрудниками сезонного состава РАЭ были установлены вежи, ограничивающие территорию, в пределах которой в советское время располагалась ВПП. Именно этот участок был приоритетным для гляциогеофизических исследований в сезон 65-й РАЭ.

В рамках проведения комплекса работ георадарные профили проводили с помощью георадара GSSI SIR-3000 (Geophysical Survey Systems Inc., США) с частотой зондирующих импульсов 900 МГц. Георадиолокационную съёмку вели по сети продольных и поперечных профилей, расстояние между которыми составляло 50–100 м. Аппаратура укладывалась в сани, после чего движение по маршрутам выполнялось пешим порядком (рис. 1, а). Керна при гляциологических исследованиях отбирали механическим буром Kovacs (Kovacs Enterprises, США) с электрическим приводом (см. рис. 1, б). Для этого использовали пять шнеков длиной 1 м. Максимальная глубина отбора керна составила 5,07 м при диаметре образца 14 см. Для изучения плотностных свойств образцы керна распиливали на отдельные фрагменты высотой 10–40 см и взвешивали на портативных электронных весах. Далее определялась плотность образцов как отношение массы каждого фрагмента к его объёму. Трещины, выявленные по данным георадиолокации на некоторой глубине, обследовали при помощи пилы для льда (см. рис. 1, в), а также шнекового бура Kovacs с диаметром шнеков 5 см. Геодезические измерения для получения абсолютных высот по маршрутам и определения уклонов рельефа выполняли с помощью GNSS-аппаратуры Leica Geo Systems (Швейцария), предоставленных АО «Аэрогеодезия». Спутниковые наблюдения вдоль профилей вели в кинематическом режиме с записью через каждые 10 м (см. рис. 1, г). Плановую привязку георадарной сети профилей и точек бурения выполняли приёмоиндикатором Garmin GPSMap 64st. Всего в ходе работ было выполнено 22 км георадарных маршрутов и отобрано 17 м образцов керна. Схема расположения профилей и пунктов гляциологических исследований приведена на рис. 2.

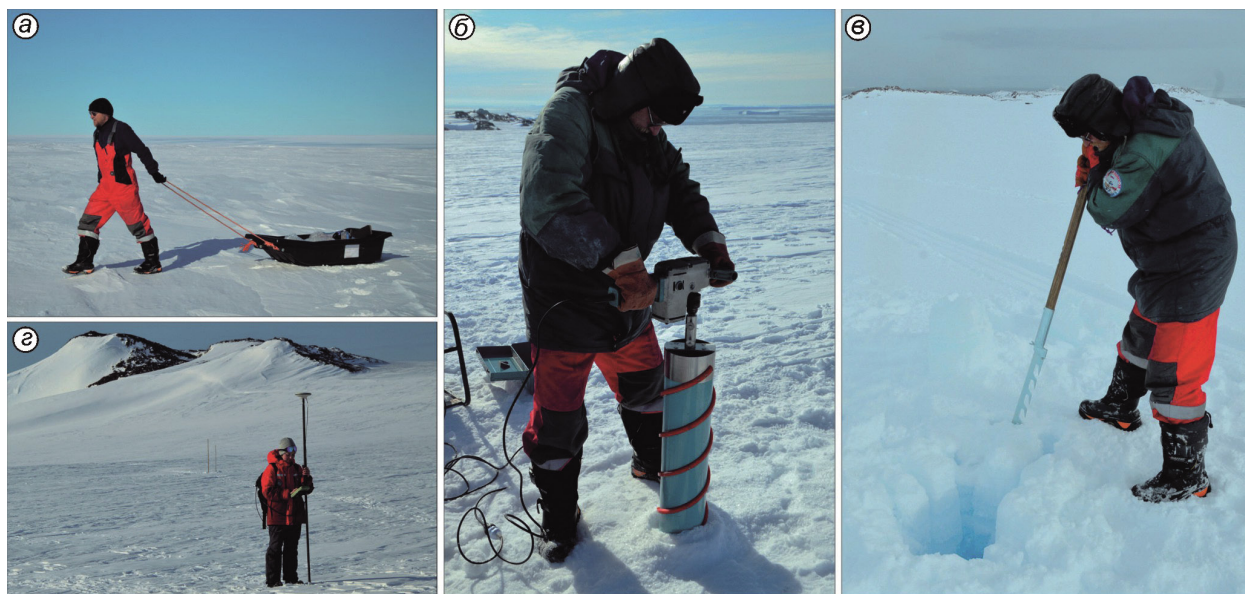


Рис. 1. Исследования в районе станции Русская:

a – георадарная съёмка; *б* – керновое бурение; *в* – обследование трещины в пределах участка предполагаемого аэродрома; *г* – спутниковые геодезические измерения

Fig. 1. The performance of works near the Russkaya station:

a – Ground Penetrating Radar survey; *b* – core drilling; *v* – inspection of a crevasse within the area of the planned runway; *z* – satellite geodesic measurements

Характеристика временных георадарных разрезов в пределах взлётно-посадочной полосы

В результате геофизических работ на участке, ограниченном вехами в 59-ю РАЭ, были выполнены осевые и поперечные маршруты. Проведение съёмки с помощью высокочастотной антенны ввиду большей разрешающей способности позволило наиболее информативно изучить строение приповерхностной части ледника, а также морфоструктурные особенности трещин. На рис. 3, *a* приведён георадарный маршрут, выполненный вдоль главной оси ВПП по Профилю 1 (ПР1). Расположение профиля показано на рис. 2. По мере продвижения по маршруту в северо-восточном направлении в строении ледниковой толщи выделяются три основные зоны. Зона 1 (см. рис. 3, *a*) представляет собой лёд, перекрытый снежно-фирновым слоем мощностью до 40 см. На волновом поле зоне 1 соответствует слабоконтрастная среда, немногочисленные интенсивные отражения в которой связаны с вариациями плотности льда. С пикета 500 м маршрута в приповерхностной части разреза фиксируется начало интенсивного снегонакопления и зону 1 сменяет зона 2, для которой

характерно переслаивание фирна и льда. С отметки 570 м маршрута отмечается начало формирования слоистой снежно-фирновой толщи 3 мощностью более 10 м.

Как уже отмечалось, по образцам, полученным при керновом бурении, определялись плотностные характеристики среды. Полученная информация о плотностях также даёт возможность оценки скоростей распространения электромагнитных волн в среде, что, в свою очередь, позволяет корректно пересчитать временной разрез в глубинный. Связь между плотностью льда и его диэлектрической проницаемостью описывается соотношением, полученным эмпирически (Мачерет, 2006):

$$\varepsilon = (1 + 0,857\rho)^2,$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды, ед.; ρ – плотность, кг/м³.

В результате расчёта кинематической модели среды определены эффективные (средние) значения диэлектрической проницаемости ε , которые в дальнейшем использовали для пересчёта временных разрезов в глубинные. Для льда в начале ВПП диэлектрическая проницаемость была принята равной 3,04, для переходной зоны

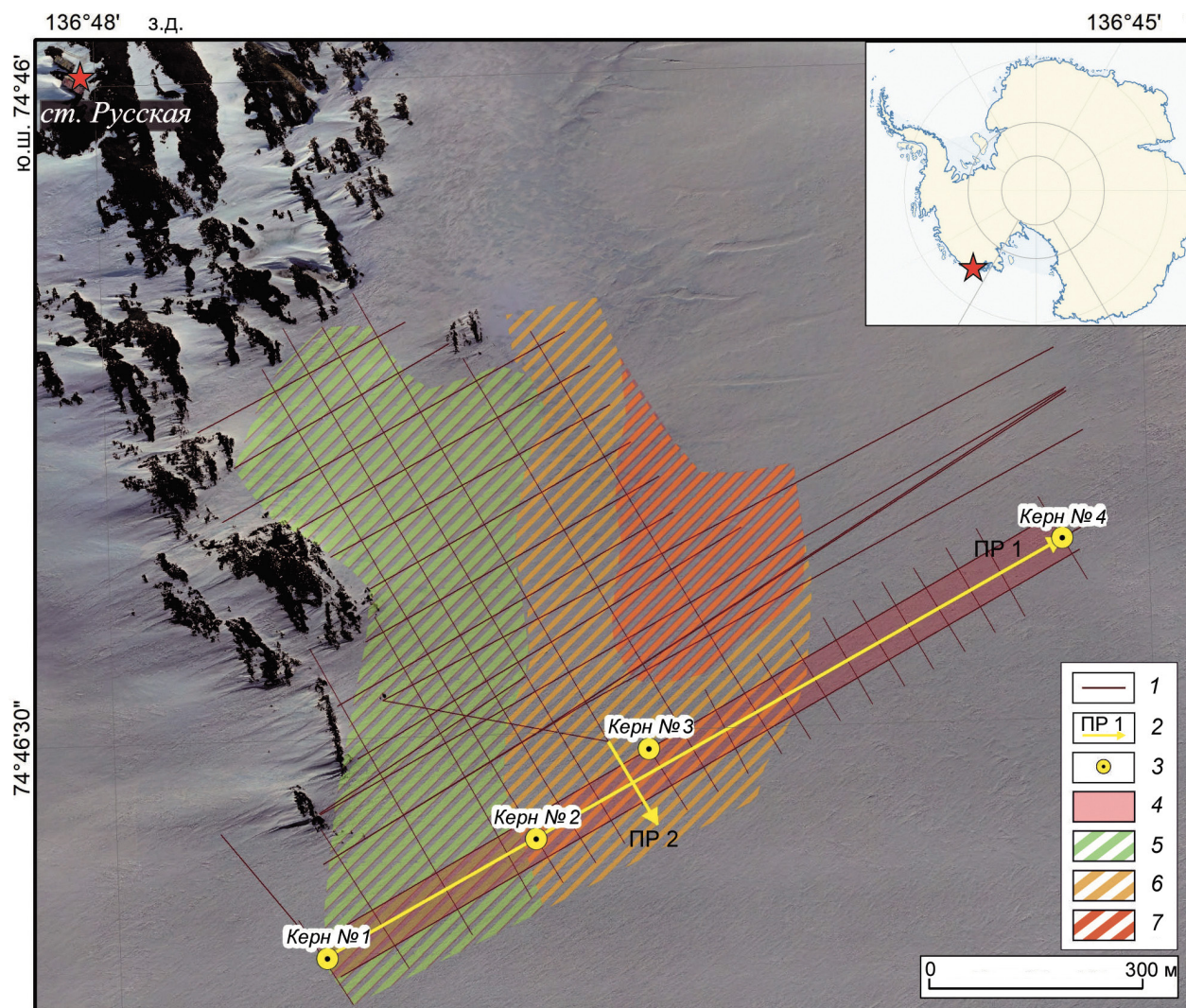


Рис. 2. Гляциогеофизические работы в районе станции Русская:

1 – сеть георадарных маршрутов в процессе полевых работ; 2 – георадарные маршруты, детально рассматриваемые в статье; 3 – пункты отбора проб керна; 4 – приоритетный участок для организации аэродрома; 5 – участок, характеризующийся отсутствием трещин; 6 – зона развития трещин в теле ледника шириной до 0,6 м; 7 – участок формирования трещин шириной более 1 м

Fig. 2. Glaciological and-geophysical works in the area of the Russkaya station:

1 – radar profiles, realized during the field work; 2 – radar profiles, considered in the article in detail; 3 – core drilling points; 4 – priority zone for the organization of the runway; 5 – area without any crevasses; 6 – area with crevasses up to 0,6 m wide; 7 – area of formation of crevasses with a width of more than 1 m

в центральной части ВПП её величина составила 2,66, а для зоны активной аккумуляции снежных осадков в конце ВПП – 1,97. На протяжении всего разреза вдоль главной оси прослеживаются контрастные границы из-за наличия в среде слоёв различной плотности. На основании данных о диэлектрической проницаемости среды ϵ получена информация о скоростях распространения электромагнитных волн, что позволило установить глубину залегания выявленных границ. В дальнейшем на основании данных об аб-

солютных отметках высот вдоль оси ВПП был построен глубинный разрез (см. рис. 3, б), показывающий изменение высот дневной поверхности 7 и отражающий действительные глубины залегания слоёв разной плотности δ .

С позиций безопасности транспортных операций в пределах ВПП наибольший интерес представляет собой зона 2 (см. рис. 3, а), так как именно для неё характерно развитие системы трещин в теле ледника. Для определения ширины трещин в ходе обработки геофизических

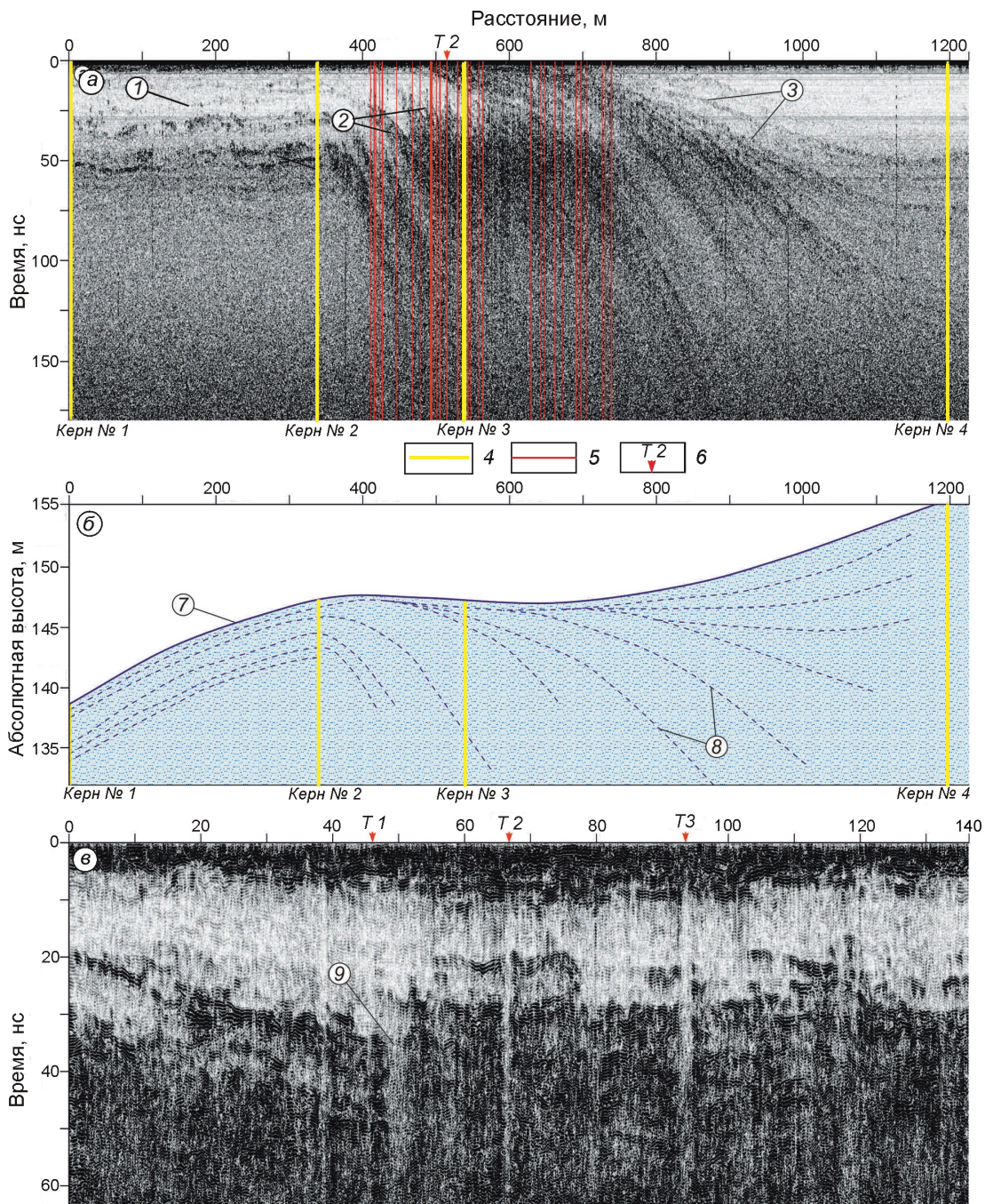


Рис. 3. Георадарные исследования в районе взлётно-посадочной полосы:

a – временной георадарный разрез по П1 вдоль главной оси посадочной полосы: 1 – зона развития льда; 2 – переходная зона с характерным переслаиванием льда и фирна; 3 – зона развития снежно-фирновой толщи; 4 – пункт отбора проб керна; 5 – положение трещин, выявленных по геофизическим данным; *б* – положение и название трещин, детально описываемых в статье; *б* – глубинный разрез вдоль главной оси посадочной полосы: 7 – абсолютные отметки высот дневной поверхности вдоль оси посадочной полосы; 8 – слои различной плотности, выявленные в леднике по данным георадиолокации; *в* – временной георадарный разрез по поперечному профилю П2: 9 – понижение интенсивности отражённого сигнала от сформированной на глубине трещины

Fig. 3. Geophysical survey in the runway area:

a – radar time section along the profile P1 as the main axis of the planned runway: 1 – ice zone; 2 – transitional zone with ice and firn; 3 – snow-firn zone; 4 – core drilling points; 5 – crevasses, identified by geophysical data; *б* – positions and numbers of crevasses described in the article in detail; *б* – depth section along the main axis of the runway: 7 – absolute heights of the surface along the runway axis; 8 – layers with different density, identified in the glacier according to geophysical survey; *в* – radar time section along the Profile P2: 9 – decrease the intensity of the reflected wave because of crevasses forming

данных вели координатную привязку каждой трассы временного георадарного разреза, что позволило рассчитать расстояние между трассами в пределах выявленных разрывных нарушений. По продольным маршрутам вдоль главной оси и боковых сторон ВПП обнаружено большое число трещин в центральной части аэродрома. Особое внимание при обработке уделено 18 трещинам, толщина снежного перекрытия над которыми составила 0,6–0,95 м, а их ширина варьирует в диапазоне 0,23–0,61 м. При изучении данных, полученных вдоль поперечных маршрутов, были также выявлены трещины в пределах указанной ранее зоны 2 (см рис. 3, а). При этом на поперечных маршрутах в центральной части ВПП установлено большое число трещин шириной до 0,8 м. Пример маршрута по Профилю 2 (ПР2) показан на рис. 3, в. На данном разрезе в пределах ВПП наблюдаются три трещины – *T1*, *T2* и *T3* по боковым сторонам и вблизи главной оси. Ширина их составляет 0,67, 0,63 и 0,7 м соответственно при глубине залегания 0,69–0,77 м. Кроме этих трещин, выделено также ещё 11 трещин, из которых шесть трещин шириной до 0,8 м располагаются на глубине менее 0,6 м.

Отметим, что трещины *T1–T3*, установленные и на продольных, и на поперечных маршрутах, имели различные морфоструктурные особенности на георадарных разрезах, т.е. отличались по ширине и глубине залегания. Поэтому было выдвинуто предположение, что, поскольку георадарные маршруты пересекают выявленные разрывные нарушения не перпендикулярно, возникает искажение истинных размеров трещин. По этой причине проведено визуальное обследование некоторых выявленных неоднородностей в пределах ВПП для оценки их безопасности.

Обследование трещин, выявленных по результатам геофизических исследований

Всего было обследовано четыре трещины: *T2* и *T3*, о которых уже шла речь ранее, а также трещины *T4* и *T5*. Расположение перечисленных разрывных нарушений показано на рис. 4.

Трещина T2 в соответствии с георадарными данными по продольным маршрутам сформировалась на глубине 0,74 м с расстоянием между стенками 0,26 м. По мере увеличения глу-

бины до 1,03 м ширина трещины возрастала до 0,62 м. Иная картина наблюдается на поперечном маршруте, где на той же начальной глубине образования (0,75 м) ширина трещины достигает 0,63 м. При визуальном обследовании трещины *T2* выявлено, что в начальной точке формирования трещины расстояние между её стенками равно 0,1 м, а толщина снежного моста составляет 0,45 м. Значительное увеличение расстояния между стенками фиксируется лишь на глубине более 1 м, как и на продольном маршруте. Для вскрытия трещины использовали бур и пилу. Азимут простирания трещины составил 121°.

Трещина T3 на продольном маршруте фиксируется на глубине 0,76 м, где её ширина составляет 0,38 м. На поперечном маршруте конфигурация трещины выражена более детально: начало трещины установлено на глубине 0,45 м с постепенным расширением её до глубины 0,75 м. Ширина при этом изменяется от 0,37 до 1,55 м, что может быть опасным при проведении транспортных операций. Согласно же визуальным оценкам и выполненному в точке обследования керновому бурению установлено, что трещина образуется на расстоянии 0,45 м от дневной поверхности. Ширина трещины в её верхней части составляет 0,1 м, а на глубине 0,8 м увеличивается до 0,2–0,3 м. Первые 10 см снежного моста имеют рыхлую текстуру, однако далее перекрытие представлено льдом высокой прочности, который был вскрыт лишь с помощью бурения. Азимут простирания трещины составил 129–130°.

Трещина T4, пересечённая продольным маршрутом, выявлена на глубине 0,65 м, её ширина – 0,25 м, которая на расстоянии 0,74 м увеличивается до 0,75 м. На поперечном же маршруте трещина установлена только на глубине 1,23 м, а ширина её не превышает 0,39 м. При обследовании самой трещины начало её формирования определено отметкой 0,57 м. По мере увеличения глубины до 1,5 м визуально прослеживалось изменение ширины в диапазоне 0,14–0,3 м. Перекрывающий трещину мост, как и в предыдущих случаях, представлен прочным льдом. Азимут простирания трещины равен 128°.

Трещина T5 шириной 0,52 м зафиксирована только на продольном маршруте на глубине 0,72 м. Однако при выполнении буровых исследований трещина была вскрыта уже на глубине

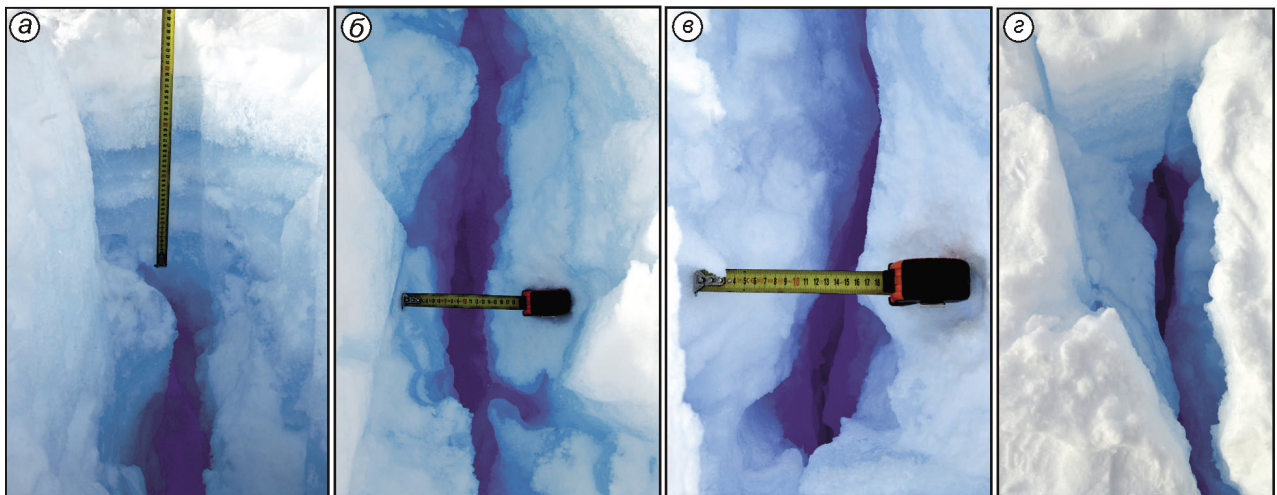
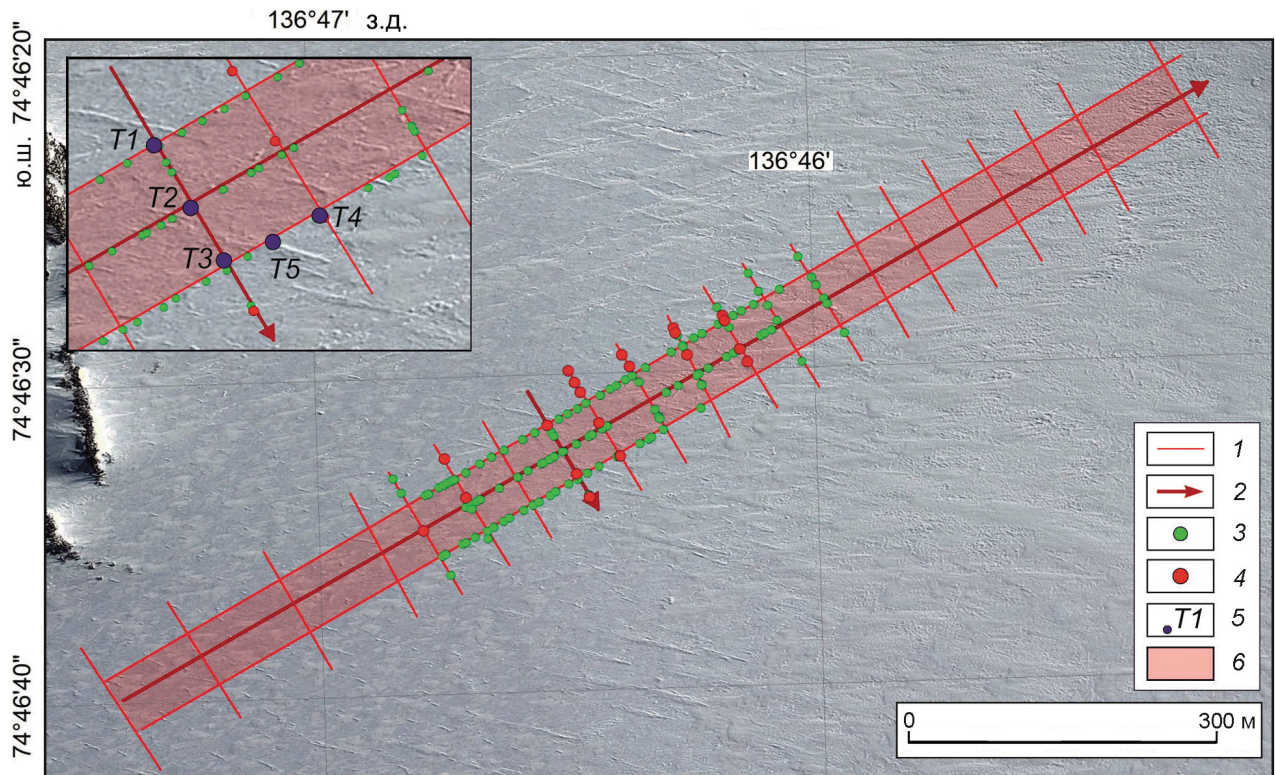


Рис. 4. Оценка характера трещиноватости ледника в районе взлётно-посадочной полосы:
 1 – георадарные маршруты в пределах аэродрома; 2 – георадарные маршруты, подробно изученные в настоящей статье; 3 – трещины, выявленные на продольных и поперечных маршрутах и отнесённые к разряду безопасных; 4 – широкие трещины, выявленные на поперечных разрезах; 5 – пункты визуального обследования трещин и их названия; б – границы аэродрома; а – снежный мост над трещиной T4; б – трещина T4; в – трещина T5; г – вид на трещину T5 сверху
Fig. 4. Characteristics of ice crevasses in the area of the runway:
 1 – radar profiles within the runway; 2 – radar Profiles 1 and 2 studied in the article in detail; 3 – crevasses identified in the time sections routes and classified as safe; 4 – wide crevasses detected in transverse sections; 5 – points of visual inspection of crevasses and their numbers; б – runway boundaries; а – snow-ice layer over crevasse T4; б – crevasse T4; в – crevasse T5; г – top view of crevasse T5

0,15 м, хотя в точке прохождения георадарного профиля мощность моста составила около 0,5 м. Трещина прослеживается на большую глубину, при этом ширина её на всём видимом протяжении изменяется в диапазоне значений 0,17–0,2 м. Азимут простирания трещины – 127°.

По результатам визуального обследования трещин установлено, что трещины $T2-T5$ располагаются в среднем на глубине 0,5 м под слоем льда высокой прочности, разрушение возможно лишь при возникновении больших точечно направленных нагрузок. Ширина трещин в их приповерхностной части составляет 0,2 м и до глубины 1 м не превышает 0,3 м (см. рис. 4). Выполненные исследования позволяют отнести трещины к разряду не опасных для проведения транспортных операций. Кроме того, сопоставление азимутов развития трещин и направления маршрутов георадарной сети подтверждает предположение об искажении истинных размеров разрывных нарушений. Так, азимут простирания трещин в среднем составляет 127° , в то время как направление продольных и поперечных маршрутов — 61° и 151° соответственно. Исходя из этого, поперечные маршруты пересекают трещины под углом 24° , а продольные — под углом 67° . Поэтому одни и те же трещины на поперечных разрезах представляются значительно шире, чем на продольных. При пересчёте расстояний между стенками трещин с учётом азимутов их ширина совпала с натурными исследованиями.

Гляциологические исследования в районе взлётно-посадочной полосы

Основной задачей гляциологических исследований было определение плотностных и структурных характеристик первых 5 м ледниковой среды от дневной поверхности. Плотностной анализ в этом случае служил основанием для оценки прочности верхней части разреза — одному из важнейших критериев с позиций безопасной организации ВПП для самолётов на лыжном шасси. Согласно нормативным документам (ВСН37–76, 1976), прочностные свойства поверхностной части ледника с плотностью снега менее 400 кг/м^3 могут быть опасны для ВПП. Кроме того, характер изменения не только плотностных, но и структурных особенностей строения приповерхностной части ледника также позволяет оценить прочностные свойства ледниковой толщи и, как следствие, пригодность площадки для организации ледового аэродрома.

Буровые работы с последующим отбором керна выполнены вдоль главной оси ВПП (см.

рис. 2). Керна № 1 и 4 получены в западной и восточной частях исследуемого участка, соответствующих началу и концу ВПП. Скважины для отбора кернов № 2 и 3 находились в центральной части аэродрома. На рис. 5, а дан стратиграфический анализ по каждому керну в пределах ВПП, а на рис. 5, б для отобранных кернов приведены плотностные профили, которые наглядно демонстрируют изменение строения ледниковой толщи по мере продвижения вдоль посадочной площадки с запада на восток.

Согласно данным стратиграфического анализа, по всей длине *керн* № 1 до глубины 3,39 м, за исключением первых 40 см, отобранный образец представляет собой лёд. В пределах глубин 0,4–2,1 м образец представляет собой прозрачный лёд б с малым количеством воздушных и снежных включений, однако по мере увеличения глубины отбора керна количество их возрастает, что дало возможность в рамках стратиграфического анализа выделить тип льда 8. Кроме того, на глубине 1,07 м установлен слой матового льда 7 толщиной 10 см. Результаты плотностного анализа керна № 1 показали, что первые 40 см керна имеют значения плотности $471,9-513,4 \text{ кг/м}^3$, что соответствует слою фирна. Далее, при переходе к слою льда, плотностные характеристики существенно увеличиваются до значений $840,9 \text{ кг/м}^3$. Заметна разница и в значениях плотностей для льда б и льда 8, отличающихся количественным содержанием вкраплений снега и воздуха. Плотность льда б, для которого характерна высокая степень однородности структуры, достигает $906,5 \text{ кг/м}^3$. Наличие большего количества включений в пределах развития льда 8 снижает общую плотность этого льда до значения $878,5 \text{ кг/м}^3$. Локальный минимум плотности, равный $863,5 \text{ кг/м}^3$, на глубине 1,1 м также коррелирует с прослоем матового льда 7.

Для *керн* № 2, за исключением его верхней части, которая представлена рыхлыми осадками, характерно ледовое строение. На протяжении всей глубины отбора керна выделены два основных типа льда — лёд б со сравнительно небольшой концентрацией включений воздуха и снега, а также лёд 7 с матовой текстурой. При этом лёд типа 7 в основном характерен для образцов керна, отобранных ближе к дневной поверхности. Однако по мере увеличения глубины в строении керна преобладающая роль отводит-

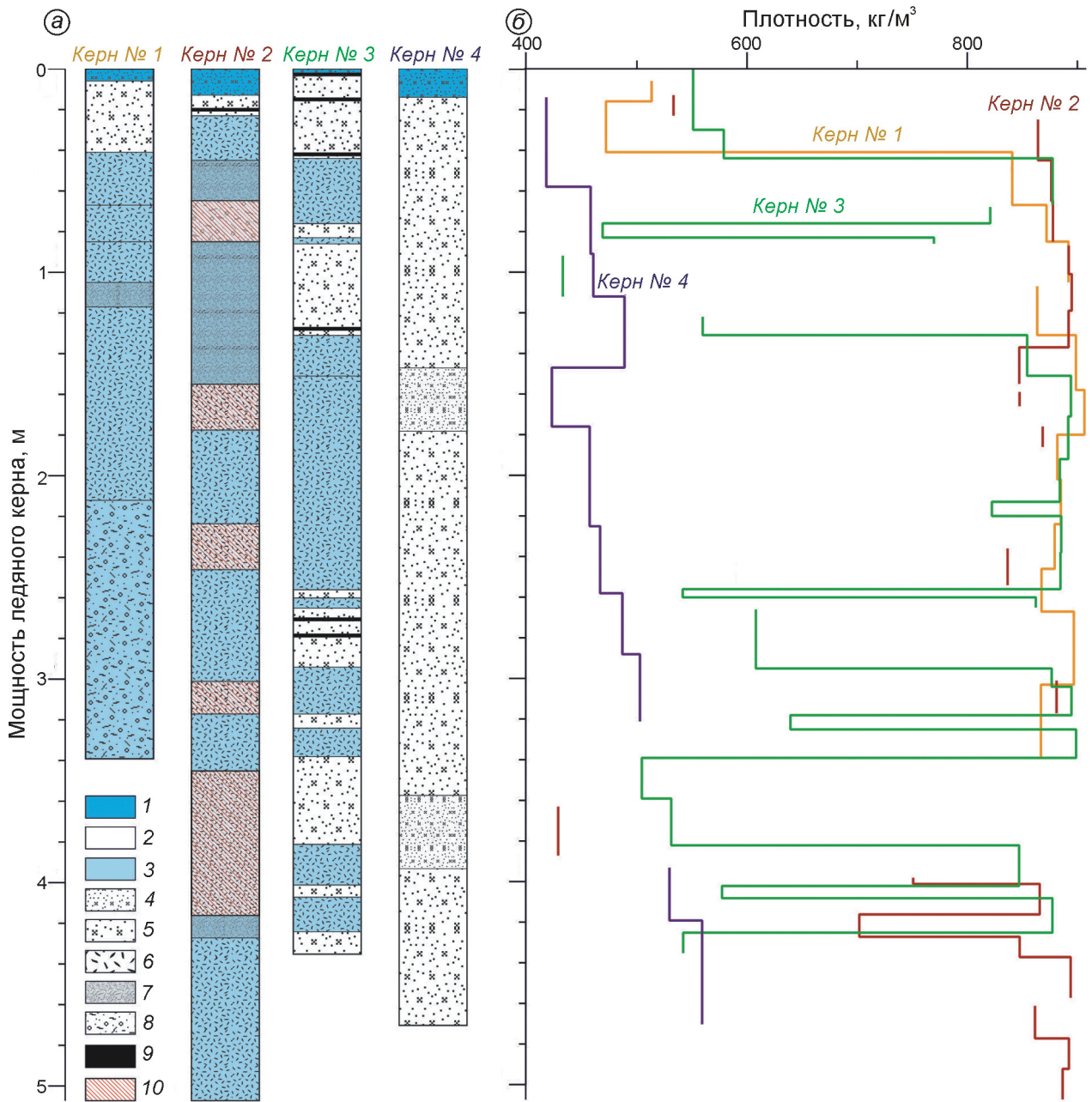


Рис. 5. Стратиграфический и плотностной анализ кернов № 1 – 4:

a – строение ледниковой толщи вдоль главной оси посадочной полосы: 1 – поверхностные снежные осадки; 2 – фирн; 3 – лёд; 4 – фирн пониженной плотности; 5 – плотный фирн; 6 – прозрачный лёд с малым количеством воздушных и снежных включений; 7 – матовый лёд; 8 – прозрачный лёд с большим количеством воздушных и снежных включений; 9 – снежно-фирновые линзы; 10 – участки развития трещин; *б* – плотностные профили, построенные для кернов № 1 – 4

Fig. 5. Stratigraphic and density analysis of cores № 1 – 4:

a – the glacial structure along the runway axis: 1 – surface snow layer; 2 – firn; 3 – ice; 4 – low-density firn; 5 – high-density firn; 6 – crystalline ice with a small number of air and snow inclusions; 7 – matte ice; 8 – crystalline ice with a large number of air and snow inclusions; 9 – snow-firn lenses; 10 – areas of crevasses formation; *б* – density profile for cores № 1 – 4

ся льду 6. Кроме того, для структуры керна № 2 в отличие от других участков бурения характерна развитая трещиноватость 10, поэтому при отборе образцов некоторые участки керна подвергались

разрушению. В связи с нарушением целостности образцов плотность льда в пределах скважины не могла быть рассчитана по всей длине керна. При анализе профиля плотности выявлены два

локальных минимума — 533,3 и 428,5 кг/м³, соответствующие слою фирна в верхней части ледника и образцу на глубине 3,6 м, подверженному формированию трещин. Также на отметке 4,2 м обнаружено локальное понижение плотности до 701,9 кг/м³, сопоставимой по результатам стратиграфического описания с прослоем матового льда 7. В остальном плотность для образцов льда, не подверженных разрушению, составила 836,63–894,9 кг/м³.

Участок отбора *керн* № 3 расположен восточнее пункта *к*ерн № 2 на расстоянии всего 200 м, однако при сравнении стратиграфического описания в этих двух скважинах наблюдаются явные различия в строении ледниковой толщи. Для *керн* № 3 характерны слои фирна мощностью 40–50 см, в связи с чем строение ледника в этом пункте исследований можно характеризовать как переслаивание фирна 5 и льда 6. Также отмечается наличие снежно-фирновых линз 9, прочностные свойства которых уступают прослоям фирна 5. Слоистая структура отобранного *керн* предполагает значительные колебания плотности образцов на всём протяжении скважины, что и продемонстрировано на плотностном профиле рис. 5, б. При этом минимумы плотности образцов, варьирующих в диапазоне 432,7–639,5 кг/м³, коррелируют с участками залегания фирновых прослоев. Фрагменты *керн*, представленные льдом 6, характеризуются повышенными значениями плотности — 820,9–898,8 кг/м³.

Керн № 4, отобранный в конце ВПП, характеризует изменение в строении верхней части ледникового покрова. На всём протяжении скважины фиксируется однородная по своей структуре среда, представленная фирном 5 и снежно-фирновыми прослоями пониженной прочности 4. В рамках выполнения плотностного анализа отмечается общее понижение плотностных свойств среды, которые варьируют в диапазоне 417,7–559,2 кг/м³, но по мере увеличения глубины отбора образцов плотность плавно возрастает по сравнению с данными, полученными при изучении *керн* № 1, 2 и 3.

Результаты исследования плотностных свойств верхней части ледниковой толщи показали, что значения плотностей в пределах 1 м от дневной поверхности превышают 400 кг/м³, т.е. величину, установленную нормативными актами (ВСН37–76, 1976). Основываясь на этом крите-

рии, данный участок был признан подходящим для организации ВПП ледового аэродрома в районе станции Русская. Что же касается строения самого ледника до глубины 5 м, то неоднородности, представленные трещиноватостью образцов *керн*, были выявлены в пределах небольших по мощности прослоев льда только при анализе *керн* № 2. Позже, вблизи пункта отбора *керн* № 2 на глубине 0,7 м была обнаружена трещина шириной около 0,3 м. Нарушение целостности горизонтов льда может быть связано именно с процессами образования трещины, следовательно, в непосредственной близости от скважины ледниковая среда имеет более высокую прочность.

Результаты

На основании интерпретации георадарных данных многочисленные обнаруженные трещины были классифицированы в соответствии с их морфометрическими характеристиками. На рис. 2 показаны зоны развития трещин по степени их безопасности в пределах исследуемого участка ледника. Зона 5, обозначенная на рис. 2 зелёным цветом, ограничивает район, для которого характерна низкая динамика ледника ввиду его расположения в непосредственной близости от сопки оазиса. Движение ледниковых масс здесь практически отсутствует, что предполагает и отсутствие трещин. По данным георадиолокации в пределах зоны 5 в теле ледника отсутствуют разрывные нарушения даже небольшого размера, поэтому участок 5 был определён как безопасный для проезда станционного транспорта.

Жёлтым цветом обозначена зона 6 — район формирования основных напряжений в теле ледника. В границах этой зоны, в основном, образуются трещины шириной до 0,6 м, что позволяет считать эту зону не опасной для проезда гусеничной техники. В пределах зоны 6 красной штриховкой показан участок 7, где по результатам геофизических работ вблизи поверхности были выявлены трещины шириной более 1 м. Эта зона подвержена наиболее интенсивному разрушению, поэтому она оценивается как опасная для проезда станционного транспорта.

Участок работ 4 (см. рис. 2) в пределах ВПП располагается в пределах зон 5 и 6, не опасных для транспортных операций. На основании ана-

лиза плотности льда вдоль участка 4 установлено, что плотностные свойства верхней части ледниковой толщи соответствуют нормативным значениям для посадочной полосы самолётов на лыжном шасси. По результатам работ сделан вывод, что ограниченный участок ледника 4 пригоден для организации посадочной площадки самолётов на лыжном шасси. Однако при последующих мониторинговых работах следует учитывать, что широкие трещины зоны 7 формируются в непосредственной близости от центральной части размеченного аэродрома.

Для безопасного проезда от станции Русская к району организации посадочной площадки была рекомендована территория в пределах зелёной зоны 5. Организация трассы в непосредственной близости к сопкам оазиса позволит исключить аварийные ситуации и обеспечить безопасность проезда стационарного транспорта к взлётно-посадочной полосе.

Заключение

В ходе работ в сезон 65-й РАЭ (2019/20 г.) выполнен комплекс гляциогеофизических исследований, цель которых — оценка безопасности участка ледника, предназначенного для организации взлётно-посадочной полосы в районе станции Русская. Изучены особенности строения ледниковой толщи в её приповерхностной части и сделаны выводы о прочностных свойствах среды на основании стратиграфического и плотностного анализа кернов. По итогам георадарных работ определены закономерности развития ледника и обозначены границы формирования снежно-фирновой толщи. По данным георадиолокации в пределах исследуемой территории выявлены участки с многочисленными трещинами, которые классифицированы по степени их опасности и отнесены к отдельным зонам. По итогам выполненных работ в пределах участка ледника, где существовала взлётно-

посадочная полоса до консервации станции Русская в 1990 г., обнаружены только небольшие трещины, что дало основание считать этот участок безопасным и пригодным для организации аэродрома. Данные кернового бурения позволили сделать вывод о высокой плотности ледниковой среды у поверхности, что также предполагает возможность организации посадочной площадки для самолётов на лыжном шасси.

Таким образом, метод георадиолокации в совокупности с гляциологическими исследованиями можно считать достаточно эффективным для выявления особенностей строения верхней части ледниковой толщи и применения этого комплекса исследований с целью обеспечения безопасности логистических операций вблизи российских антарктических станций.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотруднику ОСО 65-й РАЭ С.В. Кашину за помощь в выполнении полевых работ; руководству сезонной экспедиции 65-й РАЭ В.Л. Мартьянову и А.Н. Николаеву за помощь в организации работ; сотрудникам АО «Аэрогеодезия» Е.В. Бровкову и Д.В. Федорову за помощь при выполнении полевых изысканий; сотруднику ИФХиБПП РАН А.А. Абрамову за предоставление материалов аэрофото съёмки; экипажу ЗАО «Авиалифт Владивосток» за обеспечение логистических операций в рамках проводимых работ; Институту наук о Земле СПбГУ за предоставленную геофизическую аппаратуру.

Acknowledgments. The authors are grateful to the staff of season works of the 65 RAE S.V. Kashin for assistance in carrying out of the field work; to the head of the season works of the 65 RAE V.L. Martyanov and A.N. Nikolaev for assistance during the work organization; to the staff of «Aerogeodezia» E.V. Brovko and D.V. Fedorov for help in carrying out of the field work; to the staff of IPCA BPSS RAS A.A. Abramov for providing aerial photography data; the to the crew of «Avalift Vladivostok» for carrying out of logistic operations in the field work; to Institute of Earth Sciences of St. Petersburg State University for providing the geophysical equipment.

Литература

- Войтковский К.Ф. Основы гляциологии. М.: Наука, 1999. 256 с.
ВСН37–76. Инструкция по проектированию, строительству и оценке эксплуатационной пригодности

References

- Voitkovskiy K.F. *Osnovy glyaciologii*. Fundamentals of glaciology. Moscow: Nauka, 1999: 256 p. [In Russian].
VSN37–76. *Instrukciya po proektirovaniyu, stroitel'stvu i ocenke ekspluatacionnoj prigodnosti snezhnyh i snezhnoledivykh aéro-*

- сти снежных и снежноледовых аэродромов Антарктиды. Л.: Министерство гражданской авиации СССР, 1976. 67 с.
- Григорьева С.Д., Рыжова Е.В., Попов С.В., Кашкевич М.П., Кашкевич В.И. Строение приповерхностной части ледника в районе Бухты Тала (Восточная Антарктида) по результатам георадарных работ сезона 2018/19 г. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 2. С. 201–211. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-201-211.
- Дубровин Л.И., Козловский А.М. Советские антарктические. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 254 с.
- Киньябаева Э.Р., Григорьева С.Д., Кузнецова М.Р., Миракин А.В., Попов С.В. Комплексные изыскания по организации площадки для хранения и сборки модулей нового зимовочного комплекса станции Восток в сезон 65-й российской антарктической экспедиции // Российские полярные исследования. 2020. № 3. С. 32–35.
- Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
- Попов С.В., Межонов С.В., Поляков С.П., Мартыанов В.Л., Лукин В.В. Гляциогеофизические инженерные изыскания для подготовки лётного поля в районе российской станции Мирный, Восточная Антарктида // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 3. С. 413–426. doi: 10.15356/2076-6734-2016-3-413-426.
- Попов С.В., Поляков С.П. Георадарное лоцирование трещин в районе российских антарктических станций Прогресс и Мирный (Восточная Антарктида) в сезон 2014/15 года // Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 1. С. 90–98.
- Попов С.В., Поляков С.П., Пряхин С.С., Мартыанов В.Л., Лукин В.В. Применение гляцио-геофизических методов для обеспечения безопасности логистических операций в Антарктиде // Российские полярные исследования. 2015. Вып. 3 (21). С. 29–31.
- Попов С.В., Эберлейн Л. Опыт применения георадара для изучения строения снежно-фирновой толщи и грунта Восточной Антарктиды // Лёд и Снег. 2014. № 4 (128). С. 95–106.
- Саватюгин Л.М. Российские исследования в Антарктике. Т. III. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 335 с.
- Суханова А.А., Попов С.В., Боронина А.С., Григорьева С.Д., Кашкевич М.П. Геофизические изыскания в районе станции Прогресс, Восточная Антарктида, в сезон 63-й РАЭ (2017/18 г.) // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 1. С. 149–160. doi: 10.31857/S2076673420010030.
- Arcone S.A., Delaney A.J. GPR images of hidden crevasses in Antarctica // Proc. 8th Intern. Conf. of Ground Penetrating Radar. 2000. V. 4084. P. 760–765. doi: 10.1117/12.383512.
- Eder K., Reidler C., Mayer C., Leopold M. Crevasse detection in Alpine areas using ground penetrating radar as a dromov Antarktity. Instructions for the engineering, construction and evaluation of the operational suitability of snow and snow-ice runways in Antarctica. Leningrad: Ministry of Civil Aviation of the USSR, 1976: 67 p. [In Russian].
- Grigoreva S.D., Ryzhova E.V., Popov S.V., Kashkevich M.P., Kashkevich V.I. Structure of the near-surface part of the glacier at the area of the Thala Bay (East Antarctica) from ground-penetrating radar survey of field season 2018/19. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2019, 65 (2): 201–211. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-201-211.
- Dubrovin L.I., Kozlovsky A.M. *Sovetskie Antarkticheskie*. Soviet, Antarctic. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1991: 254 p. [In Russian].
- Kinyabaeva E.R., Grigorieva S.D., Kuznetsova M.R., Mirakin A.V., Popov S.V. Complex surveys for the organization of the area for storage and assembly of modules of the new wintering complex of the Vostok station during the 65th Russian Antarctic Expedition season. *Rossiyskie polyarnye issledovaniya*. Russian Polar Investigations. 2020, 3: 32–35. [In Russian].
- Macheret Y.Y. *Radiozondirovanie lednikov*. Radio echosounding of glaciers. Moscow: Nauchny Mir, 2006: 392 p. [In Russian].
- Popov S.V., Meznonov S.V., Polyakov S.P., Martyanov V.L., Lukin V.V. Glaciological and geophysical investigations aimed at organization of a new airfield at the Station Mirny (East Antarctica). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (3): 413–426. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2016-3-413-426.
- Popov S.V., Polyakov S.P. Ground-penetrating radar sounding of the ice crevasses in the area of the Russian Stations Progress and Mirny (East Antarctica) during the field season of 2014/15. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2016, XX (1): 90–98. [In Russian].
- Popov S.V., Polyakov S.P., Pryakhin S.S., Martyanov V.L., Lukin V.V. Application of glaciogeophysical methods for safety reasons of logistics operations in Antarctica. *Rossiyskie polyarnye issledovaniya*. Russian Polar Investigations. 2015, 3 (21): 29–31. [In Russian].
- Popov S.V., Eberlein L. Investigation of snow-firn thickness and ground in the East Antarctica by means of geophysical radar. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 4 (128): 95–106. [In Russian].
- Savatyugin L. M. *Rossiyskie issledovaniya v Antarktike*. T. III. Russian research in Antarctica. V. III. Leningrad: Hydrometeoizdat, 2001: 335 p. [In Russian].
- Sukhanova A.A., Popov S.V., Boronina A.S., Grigorieva S.D., Kashkevich M.P. Geophysical surveys in the vicinity of the Progress Station, East Antarctica, performed during the 63rd RAE season (2017/18). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (1): 149–160. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420010030.
- Arcone S.A., Delaney A.J. GPR images of hidden crevasses in Antarctica. Proc. 8th Intern. Conf. of Ground

- component for a mountain guide system // The Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2008. V. XXXVII. Part B8. P. 837–841.
- Koh G., Lever J., Arcone J., Arcone S.* Autonomous FMCW radar survey of Antarctic shear zone // Proc. of the 13th Intern. Conf. of Ground Penetrating Radar (GPR). 2010. P. 1–5. doi: 10.1109/ICGPR.2010.5550174.
- Nath P.C., Vaughan D.G.* Subsurface crevasse formation in glaciers and ice sheets // Journ. of Geophys. Research. 2003. V. 108. № B1. P. 1–12. doi:10.1029/2001JB000453.
- Taurisano A., Tronstad S., Brandt O., Kohler J.* On the use of ground penetrating radar for detecting and reducing crevasse-hazard in Dronning Maud Land, Antarctica // Cold Regions Science and Technology. 2006. V. 45. P. 166–177. doi: 10.1016/j.coldregions.2006.03.005.
- Zamora R., Casassa G., Rivera A., Ordenes F., Neira G., Araya L., Mella R., Bunster C.* Crevasse detection in glaciers of southern Chile and Antarctica by means of ground penetrating radar // IAHS-AISH publication. 2005. V. 318. P. 153–162.
- Penetrating Radar. 2000, 4084: 760–765. doi: 10.1117/12.383512.
- Eder K., Reidler C., Mayer C., Leopold M.* Crevasse detection in Alpine areas using ground penetrating radar as a component for a mountain guide system. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2008, B8 (XXXVII): 837–841.
- Koh G., Lever J., Arcone J., Arcone S.* Autonomous FMCW radar survey of Antarctic shear zone. Proc. of the 13th Intern. Conf. on Ground Penetrating Radar (GPR). 2010: 1–5. doi: 10.1109/ICGPR.2010.5550174.
- Nath P.C., Vaughan D.G.* Subsurface crevasse formation in glaciers and ice sheets. Journ. of Geophys. Research. 2003, 108 (B1): 1–12. doi: 10.1029/2001JB000453.
- Taurisano A., Tronstad S., Brandt O., Kohler J.* On the use of ground penetrating radar for detecting and reducing crevasse-hazard in Dronning Maud Land, Antarctica. Cold Regions Science and Technology. 2006, 45: 166–177. doi: 10.1016/j.coldregions.2006.03.005.
- Zamora R., Casassa G., Rivera A., Ordenes F., Neira G., Araya L., Mella R., Bunster C.* Crevasse detection in glaciers of southern Chile and Antarctica by means of ground penetrating radar. IAHS Processings. 2005, 318: 153–162.