

Прикладные проблемы

УДК 551.32

DOI: 10.31857/S2076673422040156, EDN: MIOLRA

Состояние взлётно-посадочной полосы станции Новолазаревская (Восточная Антарктида) и оценка безопасности её эксплуатации по данным исследований 2021 г.

© 2022 г. С.В. Попов^{1,2*}, М.П. Кашкевич², А.С. Боронина^{3,2}¹Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург, Россия;²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;³Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

*spopov67@yandex.ru

The condition of the runway at Novolazarevskaya Station (East Antarctica) and the safety assessment of its use based on the 2021 research data

S.V. Popov^{1,2*}, M.P. Kashkevich², A.S. Boronina^{2,3}¹Polar Marine Geosurvey Expedition, St. Petersburg, Russia;²Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;³State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

*spopov67@yandex.ru

Received April 21, 2022 / Revised June 16, 2022 / Accepted October 7, 2022

Keywords: *ice crevasses, hazardous glaciological processes, airfield, flight safety, GPR profiling, Novo Runway, East Antarctica.*

Summary

Airbase Novo Runway has the status of the largest transport hub in the northern part of Antarctica, which can land large airlifter on wheeled chassis. However, the unsteady flow of the glacier leads both to the formation of hazardous glacial crevasses and changes the configuration of the runway. The purpose of this study was to investigate the state of the Novo Runway and to identify the degree of uneven flow of the glacier in this area. The article shows the results of research carried out from late October to mid-December 2021. Field work included GPR profiling, tacheometric survey, mechanical drilling, and downhole thermometry. The tacheometric survey was carried out at the beginning and at the end of the field work (in 42 days) to determine the displacements of pickets fixed on the glacier and then to calculate the glacier deformation rates. The results of the studies showed that there are no open crevasses in this area, which pose a danger to aircraft. There are non-hazardous healed crevasses at the beginning and end of the runway. At the same time, GPR data indicate that in the central part of the runway (at the distances from 1720 meters to 2240 meters from its beginning), there is a zone of junction of glacial flows. This zone is traced on parallel profiles for more than one kilometer. Calculation results indicate that the strain rates in this area in the transverse direction (across the runway) reaches -0.183 year^{-1} . This corresponds to deformations (compressions) of more than 1.4 meters over 42 days of observations in absolute terms. Although these values significantly exceed the threshold values, there were no open crevasses in the glacier. It can be assumed that relatively recently the glacier flowed more slowly than now. This research should be continued to draw broader conclusions about the dynamics of the glacier in the area of the Novo Runway.

Citation: Popov S.V., Kashkevich M.P., Boronina A.S. The condition of the runway at Novolazarevskaya Station (East Antarctica) and the safety assessment of its use based on the 2021 research data. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2022, 62 (4): 621–636 [In Russian].
doi: 10.31857/S2076673422040156, edn: miolra

Поступила 21 апреля 2022 г. / После доработки 16 июня 2022 г. / Принята к печати 7 октября 2022 г.

Ключевые слова: *трещины, опасные гляциологические явления, взлётно-посадочная полоса, безопасность полётов, георадарное профилирование, Новолазаревская, Восточная Антарктида.*

Рассмотрены результаты комплексных инженерных изысканий, выполненных на посадочной площадке станции Новолазаревская в сезон 2021/22 г. Установлено, что в центральной части взлётно-посадочной полосы наблюдается сочленение двух ледовых потоков. Абсолютные скорости деформаций ледника на этом участке достигают $-0,183 \text{ год}^{-1}$, что существенно превышает пороговые значения, однако открытых трещин в леднике не наблюдалось.

Введение

Авиационное сообщение играет важную, а иногда и определяющую роль в обеспечении полярных станций, полевых баз и выносных геологических лагерей не только для нашей страны, но и всего международного антарктического сообщества. В настоящее время в Антарктиде насчитывается более 50 посадочных площадок, которые принадлежат более чем 20 государствам (Поляков и др., 2015). Здесь следует обратиться к формальной авиационной терминологии. Статьей 40 Воздушного кодекса Российской Федерации № 60-ФЗ от 19.03.1997 г., принятого Государственной Думой и одобренного Советом Федераций с последующими изменениями и дополнениями, а также Федеральными авиационными правилами «Требования, предъявляемые к аэродромам, предназначенным для взлета, посадки, руления и стоянки гражданских воздушных судов», утвержденными приказом Минтранса России от 25.08.2015 г. № 262, введена следующая терминология: *взлётно-посадочная полоса (ВПП)* – определённый прямоугольный участок сухопутного аэродрома, подготовленный для посадки и взлёта воздушных судов; *посадочная площадка* – участок земли, льда, поверхности сооружения, в том числе поверхности плавучего сооружения, либо акватория, предназначенные для взлёта, посадки или для взлёта, посадки, руления и стоянки воздушных судов; *аэродром* – участок земли или акватория с расположенными на нём зданиями, сооружениями и оборудованием, предназначенный для взлёта, посадки, руления и стоянки воздушных судов; *перрон* – определённая площадь сухопутного аэродрома, предназначенная для размещения воздушных судов в целях посадки или высадки пассажиров, погрузки или выгрузки почты или грузов, заправки, стоянки или технического обслуживания ВПП. У Российской Федерации есть десять зимовочных станций и полевых баз, которые активно действуют или периодически посещаются. Среди них – круглогодичные зимовочные станции Мирный, Восток, Новолазаревская, Беллинсгаузен и Прогресс, а также действующие полевые базы – Ленинградская, Русская, Молодёжная и Оазис Бангера. При этом сезонная база Русская в соответствии со «Стратегией развития деятельности Россий-

ской Федерации в Антарктике до 2030 года», утверждённой распоряжением Правительства РФ № 2143-р от 21.08.2020 г., в скором времени должна перейти в разряд зимовочных станций. Все перечисленные объекты Российской антарктической экспедиции (РАЭ), за исключением Русской и Ленинградской, имеют ВПП.

Наряду с этим, посадочная площадка станции Новолазаревская (Novo Runway) имеет особое значение. Её строительство организовано в соответствии с приказами Министерства гражданской авиации и Госкомгидромета для обеспечения перелёта тяжёлых самолётов на колёсном шасси непосредственно с территории нашей страны в Антарктиду. При поиске места для расположения ВПП применялся опыт многолетних исследований и экспериментальных работ сотрудников НИИ «Ленаэропроект» по созданию ВПП на станции Молодёжная (Саватюгин, Преображенская, 2000). Ледовая ВПП в районе станции Новолазаревская была введена в эксплуатацию и занесена в реестр российских аэродромов в декабре 1981 г. (Ice runway..., 2001). Она интенсивно эксплуатировалась вплоть до ноября 1991 г., но в дальнейшем полёты пришлось вынужденно приостановить из-за недостатка финансирования. С 2001 г. посадочная площадка станции Новолазаревская обеспечивает межконтинентальную воздушную связь между г. Кейптаун и пунктами назначений в пределах Земли Королевы Мод и носит статус крупнейшего транспортного узла в северной части материка (Лукин, 2015). В индоатлантическом секторе Антарктики это – одна из немногих ВПП, способных принимать крупные транспортные самолёты на колёсном шасси (рис. 1, а). За всё время существования посадочная площадка принимала самолёты разных типов: Boeing 727-200, Ил-76ТД (регулярно), Basler BT-67 и АН-2 (регулярно), а также Twin Otter и Gulfstream III. Число полётов в год зависит от логистических и научных задач национальных программ, входящих в систему DROMLAN (Dronning Maud Land Air Network) (Inagaki, 2020).

Посадочная площадка станции Новолазаревская ввиду своего местоположения подвержена различным потенциально опасным гляциологическим процессам. Естественное неравномерное движение ледника приводит не только к формированию трещин в его приповерхностной части, но и изменяет конфигурацию взлётно-

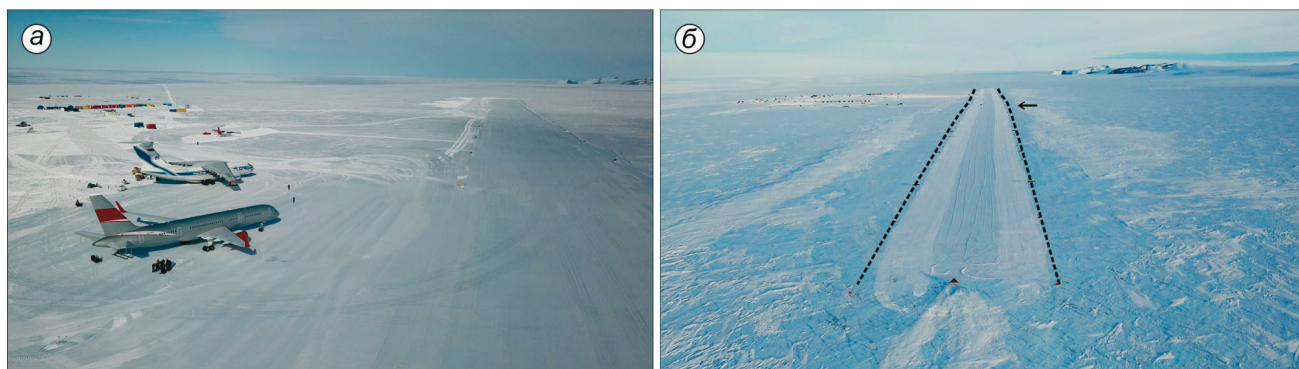


Рис. 1. Ледовая посадочная площадка станции Новолазаревская:

a – общий вид (из открытых источников); *б* – искривлённая взлётно-посадочная полоса. Фото В.В. Першина, октябрь 2020 г.

Fig. 1. Ice airfield of Novolazarevskaya Station:

a – common view (from open source); *b* – curved runway (photo by V.V. Pershin, October 2020)

посадочной полосы. Так, к 2021 г. ВПП искривилась настолько существенно, что потребовалась её корректировка (см. рис. 1, б). В сезон 66-й РАЭ (2020/21 г.) сотрудники АО «Аэрогеодезия» выполнили необходимую коррекцию искривления линии осевых знаков (Мартьянов, 2021). Согласно информации, предоставленной Д.В. Федоровым (АО «Аэрогеодезия»), ось ВПП искривлена с максимальным значением в центре (отклонение до 6 м) и с уменьшением к краям (отклонение до 1–2 м). Выявление степени неравномерности течения ледника, влияющего на безопасность дальнейшего использования ВПП из-за возможного формирования трещин не только в её краевых частях, но и по всему периметру, – важная задача обеспечения безопасности транспортных операций. В качестве первого рекогносцировочного этапа в ходе весенне-летнего полевого сезона 67-й РАЭ в октябре – декабре 2021 г. на посадочной площадке станции Новолазаревская выполнен комплекс инженерных изысканий, направленный на решение задач обеспечения безопасности авиационных сообщений РАЭ (Попов и др., 2022).

Район работ

Посадочная площадка станции Новолазаревская расположена на периферийной части Восточно-Антарктического ледникового покрова Земли Королевы Мод (Dronning Maud Land) в 7 км от оазиса Ширмахера (Schirmacher Oasis) на высоте около 550 м над ур. моря (рис. 2).

В начале каждого тёплого сезона техническая аэродромная группа из сотрудников станции Новолазаревская и Международного антарктического логистического центра ALCI (Antarctic Logistics Center International) начинает подготовку взлётно-посадочной полосы для приёма среднемагистральных самолётов (дальность от 2,5 до 6 тыс. км) и тяжёлых транспортных самолётов на колёсном шасси. Длина ВПП составляет 3000 м при ширине 60 м. Координаты её центра: 70°49'28,1" ю.ш., 11°37'51,9" в.д. (Федоров, АО «Аэрогеодезия», 2021). Уникальная особенность этой части ледника состоит в том, что она представляет собой зону «голубого льда», для которой характерно отсутствие постоянного снежного покрова (Поляков, 2015). Это приводит к тому, что поверхность ледника состоит из твёрдого ледяного покрытия, поэтому на неё после проведения относительно небольших подготовительных работ могут приземляться самолёты на колёсном шасси. Зоны «голубого льда» крайне малочисленны и вызывают большой интерес для логистического обеспечения антарктических исследований (Поляков, 2015; Markov et al., 2019). Взлётно-посадочная полоса станции Новолазаревская функционирует исключительно в тёплый сезон (как правило, с середины октября до конца февраля) – в период более благоприятных погодных условий для авиации. С одной стороны, антарктическим летом снижается количество осадков и скорость ветра, а следовательно, уменьшается вероятность формирования явлений, ухудшающих видимость, в основном сильных снегопадов и метелей. С дру-

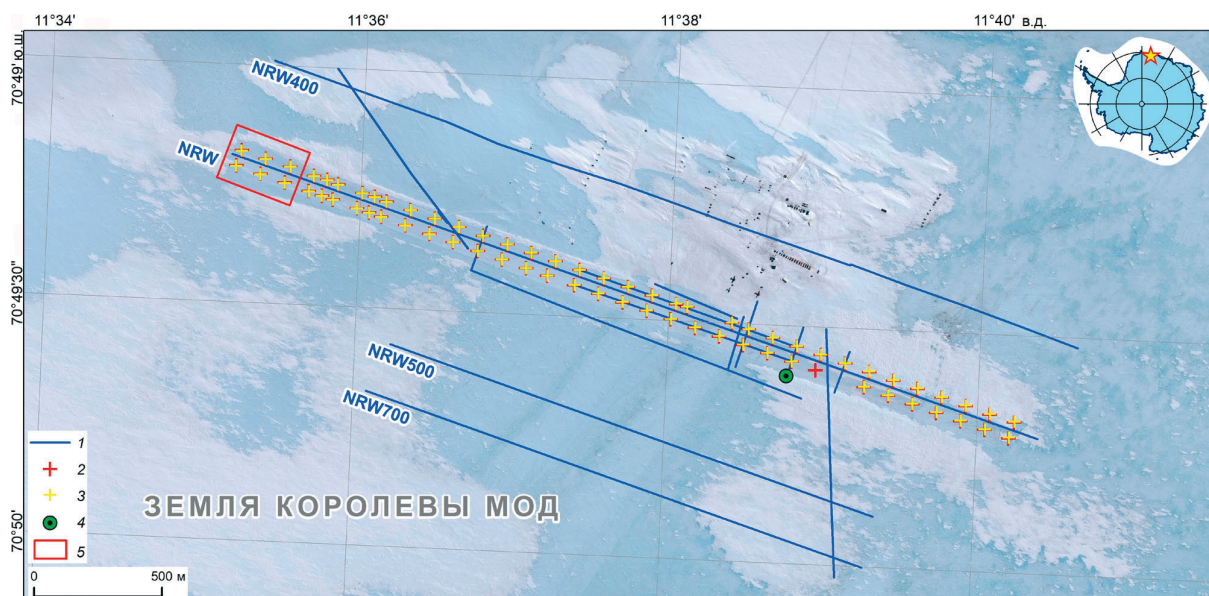


Рис. 2. Схема расположения работ в районе посадочной площадки:
 1 – георадарные маршруты; 2 – пункты первой серии тахеометрической съёмки; 3 – пункты второй серии тахеометрической съёмки; 4 – скважина, в которой выполнялась термометрия; 5 – район бурения трещин

Fig. 2. Location map of the engineering research in the airfield area:
 1 – GPR routes; 2 – points of the first series of tacheometric survey; 3 – points of the second series of tacheometric survey; 4 – temperature borehole; 5 – ice crevasses drilling area

гой стороны, из-за повышения температуры воздуха и высоких значений солнечной радиации летом (как правило в январе) начинается интенсивное таяние, ввиду чего на ВПП образуются снежицы и водотоки талой воды. Одновременно с этим преимущественно в начале ВПП формируются трещины. Эти факторы на некоторое время делают полосу не пригодной для эксплуатации, а в особенно аномально тёплые и малоснежные годы в январе объявляют перерывы в полётах. В осенне-зимний сезон талая вода в трещинах замерзает, тем самым «залечивая» их.

Постановка задачи

В задачи инженерных изысканий входило выяснение особенностей строения приповерхностной части ледника, на котором организована посадочная площадка. Особый интерес представляет выявление трещин, поскольку их наличие способно привести к лётному происшествию при взлёте и посадке самолёта. Помимо этого, к задачам исследования относилось выяснение возможности возникновения трещин на ВПП, боковых и торцевых зонах безопасности,

а также на перроне. На протяжении полувека, с начала планомерного изучения этой территории гляциологическими и геофизическими методами, покровный ледник в этом районе считался достаточно стабильным. Однако сейчас возникают некоторые опасения по поводу изменения характера течения ледника ввиду наблюдаемых климатических изменений. Совершенно понятно, что одно лишь описание строения приповерхностной части ледника на момент выполнения работ представляет достаточно ограниченный интерес. В прикладном аспекте гораздо важнее выяснить, как может изменяться характер его движения с течением времени и как это скажется на состоянии ВПП и посадочной площадки в целом. Поэтому исследования не ограничивались лишь территорией ВПП, а захватывали чуть больший район.

Методика выполнения полевых работ и обработки данных

Полевые изыскания выполнены в период с 30 октября по 5 ноября и с 14 по 15 декабря 2021 г. Комплекс работ включал в себя георадар-

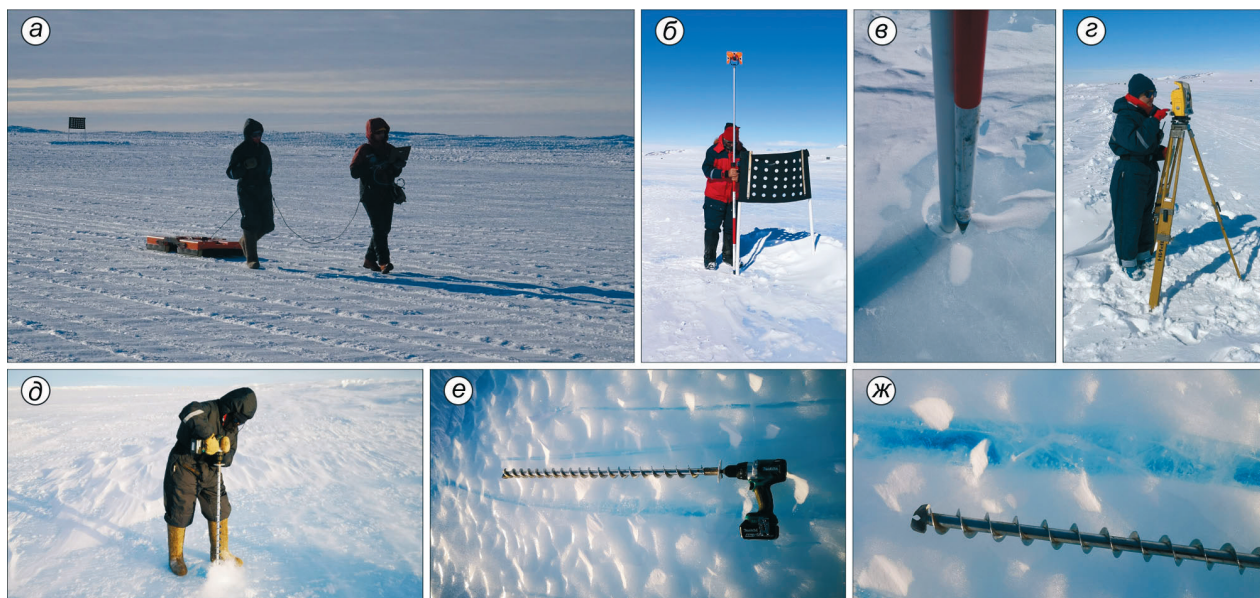


Рис. 3. Процесс выполнения полевых исследований:

a – георадарное зондирование на частоте 150 МГц; *б* – знаки разметки ВПП, используемые как пикеты; *в* – установка вешки с отражателем рядом с опорой разметки; *г* – тахеометрическая съёмка; *д* – шнековое бурение; *е, ж* – состояние трещин в начале взлётно-посадочной полосы

Fig. 3. Performing of the field work:

a – GPR sounding at a frequency of 150 MHz; *б* – runway markings used as pickets; *в* – geodetic pole next to the marking support; *г* – tachymetric survey; *д* – auger drilling; *е, ж* – crevasses at the start of the runway

ное профилирование, тахеометрические измерения, бурение и термометрию в скважине (см. рис. 2). Изучение приповерхностной части ледника выполнялось методом георадиолокации, который, в частности, хорошо зарекомендовал себя при выборе места для строительства аэродрома на станции Мирный, а также при выявлении трещин на участках трассы следования санно-гусеничного похода «Прогресс – Восток» (Попов, Поляков, 2016; Попов и др., 2017). Для оценки деформаций ледника в районе ВПП и последующего выявления областей, подверженных образованию трещин в начале и в конце полевого сезона проведены две серии тахеометрических измерений. Детальный обзор подобных моделей представлен в работе (Colgan et al., 2016). Однако для их применения требуется знание о мощности ледника (точно она неизвестна, и по оценкам может составлять несколько сотен метров), а также температуры его толщи. Для этого в приповерхностной части ледника пробурена двухметровая скважина. Её положение см. на рис. 2. Для составления общего представления о состоянии визуально обнаруженных трещин некоторые из них разбурены. Рассмотрим

методику выполнения каждого из видов работ более подробно.

Георадарное профилирование выполнялось с применением георадаров ОКО–2 (ООО «Логистические системы», Россия) и антенны с частотой зондирующих импульсов 150 и 400 МГц. Съёмка осуществлялась пешим порядком (рис. 3, *a*). Для повышения точности в работах применялся одометр, который обеспечивал равномерность регистрации данных по маршруту через каждые 10 см. Плановая привязка выполнялась по навигационным спутникам систем GPS и GLONASS с применением приёмника индикатора Garmin GPSMap 64 (Garmin Ltd., Taiwan). Её точность составляет первые метры. Общая протяжённость маршрутов составила 17,2 км. Схема их расположения представлена на рис. 2. Георадарные данные обрабатывались по стандартной методике в программе Geoscan32, детально изложенной в работах (Владов, Золотарев, 1997; Владов, Старовойтов, 2004).

Основная сложность при обработке и последующей интерпретации георадарных данных связана с выбором кинематической модели среды, от которой зависит корректность пере-

счёта временных разрезов в глубинные. В работе эта ситуация упрощается, поскольку посадочная площадка расположена на «голубом льду», для которого характерно либо полное отсутствие снежного покрова, либо его мощность весьма незначительна. Это подтверждалось как визуально, так и в процессе шнекового бурения. Таким образом, пересчёт временного георадарного разреза в глубинный выполнялся в рамках модели однородной среды с диэлектрической проницаемостью ϵ равной 3,17, что соответствует скорости распространения электромагнитных волн 168,5 м/мкс (Мачерет, 2006).

Тахеометрическая съёмка проводилась для инструментальных измерений деформаций в теле ледника в районе ВПП по аналогии с работами Джона Ная (Nye, 1959). Для этого с интервалом 42 дня (31 октября и 14 декабря 2021 г.) выполнены две съёмки жёстко закреплённых на местности пунктов, расположенных в районе ВПП. В качестве пикетов учитывались знаки аэродромной разметки (см. рис. 3, б), установленные примерно через каждые 100 м по обе стороны от оси ВПП. Их положение не планируется корректировать на протяжении последующих пяти лет. Вешку с отражателем устанавливали однообразно, вплотную к столбу разметки, ближайшему со стороны перрона (см. рис. 3, в). Работы велись с помощью тахеометра Trimble M3 DR 5" (Trimble Navigation Ltd, USA). Прибор установлен на возвышенном открытом месте с наилучшим обзором территории. Это 800-й метр от начала полосы (см. рис. 2; см. рис. 3, г). Съёмка выполнялась с одного места стояния в течение одного дня, чтобы исключить влияние смещения ледника на результат. Для увеличения дальности и точности измерений в качестве отражателя применялась призма 1P, позволяющая вести съёмку на расстоянии до 5 км от прибора. В работах максимальное удаление вешки с отражателем достигало 2,2 км. Всего выполнено 70 измерений в первом случае и 69 – во втором. В итоге для последующих расчётов учитывалось 68 пунктов (см. рис. 2). Погрешность измерений оценена в 0,01 м. Съёмка выполнялась в локальной системе координат, выбор которой обусловлен отсутствием поблизости пунктов Государственной геодезической опорной сети с известными планово-высотными координатами.

Необходимости точного координирования пунктов на местности не было, поскольку для расчётов деформаций требуется только измерение расстояний между жёстко закреплёнными пикетами. Плановое положение в абсолютной системе координат рассчитано исключительно для визуализации данных и нанесения пунктов съёмки на схему. Пересчёт данных локальной системы координат тахеометрической съёмки на картографическую проекцию проводился по 33 точкам с применением ранее разработанного программного обеспечения (Попов, Борони-на, 2019).

Шнековое бурение для установки термокосы и разбуривания трещин проводили при помощи дрели-шуруповерта Makita DDF451RFE 18 В (Makita Inc., Japan), к которой присоединялись шнеки Kovacs (Kovacs Enterprises, USA) длиной 1 м и диаметром 50 мм (см. рис. 3, д). Максимальная глубина пробуренных скважин составила 6 м. Пункты для выполнения бурения и последующей термометрии выбирались исходя из результатов геофизической съёмки. Трещины разбурены преимущественно на глубину одного шнека, а для термометрии пробурена скважина глубиной 1,9 м.

Термометрия выполнена в одной скважине, расположенной к югу от центральной части ВПП (см. рис. 2). Коса представляла собой тарированные датчики NTC-10k, собранные на основе термисторов с применением логгеров IBS-TH1 (Inkbird Tech. S.L., China). В косе применялись восемь датчиков. Первый, самый верхний, располагался на поверхности ледника и присыпался снегом, чтобы защитить его от прямых солнечных лучей. Следующий установлен на глубине 40 см, а остальные фиксировались на косе с интервалом 25 см. Чтобы избежать конвекции воздуха – скважину закрыли. Временной интервал регистрации температур составлял 10 минут. Данные регистрировались на протяжении четырёх суток.

Расчёт деформаций в теле ледника выполнялся в соответствии с методикой, изложенной в работе (Nye, 1959). Неравномерное движение ледника вызывает в нём напряжения, которые в свою очередь приводят к деформациям и могут быть инструментально измерены. Подобного рода исследования начали выполнять на заре планомерного изучения Антарктиды и связаны с имена-

ми Джона Глена и Джона Ная. В конечном итоге они привели к созданию современных математических моделей динамики ледника. Достаточно детальный обзор вопросов, связанных с формированием трещин, приводится в обширных работах (Colgan et al., 2016; Pook, 2000; González-Velázquez, 2021; Jennings, Hambrey, 2021).

Величина скорости деформации $\dot{\epsilon}$ определяется как относительное изменение расстояния между некоторыми пунктами за единицу времени Δt , т.е.

$$\dot{\epsilon} = (1/\Delta t)((l_2 - l_1)/l_1),$$

где l_1 и l_2 – начальные и конечные расстояния между пунктами.

Таким образом, её можно инструментально измерить, что и сделано в процессе полевых работ путём выполнения двух серий тахеометрических съёмки. Следуя работе (Nye, 1959), скорости деформаций отдельно рассчитаны для продольного $\dot{\epsilon}_L$ и поперечного $\dot{\epsilon}_T$ по отношению к направлению оси ВПП. Затем $\dot{\epsilon}_L$ и $\dot{\epsilon}_T$ усреднены по соседним сторонам, которые образуют четырёхугольник, и приведены к его середине в виде значений $\bar{\dot{\epsilon}}_L$ и $\bar{\dot{\epsilon}}_T$ соответственно.

Результаты работ

Строение приповерхностной части ледника – определяющий фактор принятия решения о функционировании посадочной площадки в штатном режиме. При этом основная задача заключается в выявлении трещин, которые могут стать причиной возникновения лётного происшествия. Как международный опыт, так и результаты многолетних работ авторов показывают, что наиболее эффективный метод выяснения строения ледника – георадиолокация (Jol, 2009; Попов, Эберляйн, 2014; Попов и др., 2017). При этом визуальные наблюдения также необходимы, особенно в областях «голубого льда», на которых отсутствует снежно-фирновая толща, маскирующая приповерхностные трещины.

Визуальные наблюдения, выполненные на ВПП, а также на прилегающих к ней боковых и торцевых зонах безопасности и перроне, показали, что видимые открытые трещины отсутствуют. В начале ВПП (примерно первые 600 м) существуют залеченные трещины, которые

представляют собой линейные дайкообразные структуры голубого цвета, контрастно выделяющиеся на фоне более светлого массива льда (см. рис. 3, *е*). Их ширина составляла 10–15 см и только в отдельных случаях превышала 20 см. Наиболее крупные из трещин разбурены на глубину одного шнека – 1 м. Основываясь на характере его заглупления, пустоты внутри трещины отсутствовали. Предположено, что в период интенсивного приповерхностного таяния в тёплый сезон года трещины заполнялись талой водой, которая в дальнейшем замерзала. Такой вывод позволил выяснить внешний вид трещин: их прозрачность, выраженное отличие от окружающего ледника, особенности конфигурации (см. рис. 3, *е, ж*). Аналогичная ситуация наблюдалась на голубом льду в районе Сопки Ветров (станция Мирный, Земля Королевы Мэри, Восточная Антарктида), где трещины, образовавшиеся в результате неравномерного движения ледника, в тёплые летние месяцы заполнялись талой водой, затем замерзали и таким образом залечивались. Процесс залечивания трещин на ВПП станции Новолазаревская – аналогичен.

В качестве примера на рис. 4, *а* приведён временной георадарный разрез по маршруту NRW, расположенному вдоль ВПП по его средней части. Он достаточно типичен для этого района. Положение маршрута в плане см. на рис. 2. Для более чёткого выявления внутренних отражающих границ и повышения качества представляемого материала при обработке выполнена горизонтальная фильтрация. Однако эта процедура привела к ослаблению прямой волны 1, от положения которой проводится отсчёт глубин, поэтому визуально она практически не выявляется.

По характеру волнового поля район ВПП подразделяется на три области. Первая область простирается от начала полосы до 1720 м., вторая – от конца первой до 2240 м, третья – от предыдущей до конца ВПП (см. рис. 4, *а*). Для *первой области* характерна волнообразная ненарушенная структура слоистости ледника 2, осложнённая залеченными трещинами 3. Волнообразная структура слоистости обусловлена характером подлёдного рельефа, который, судя по наличию расположенных поблизости горных выходов, залегает на относительно небольших глубинах. Однако зарегистрировать отраже-

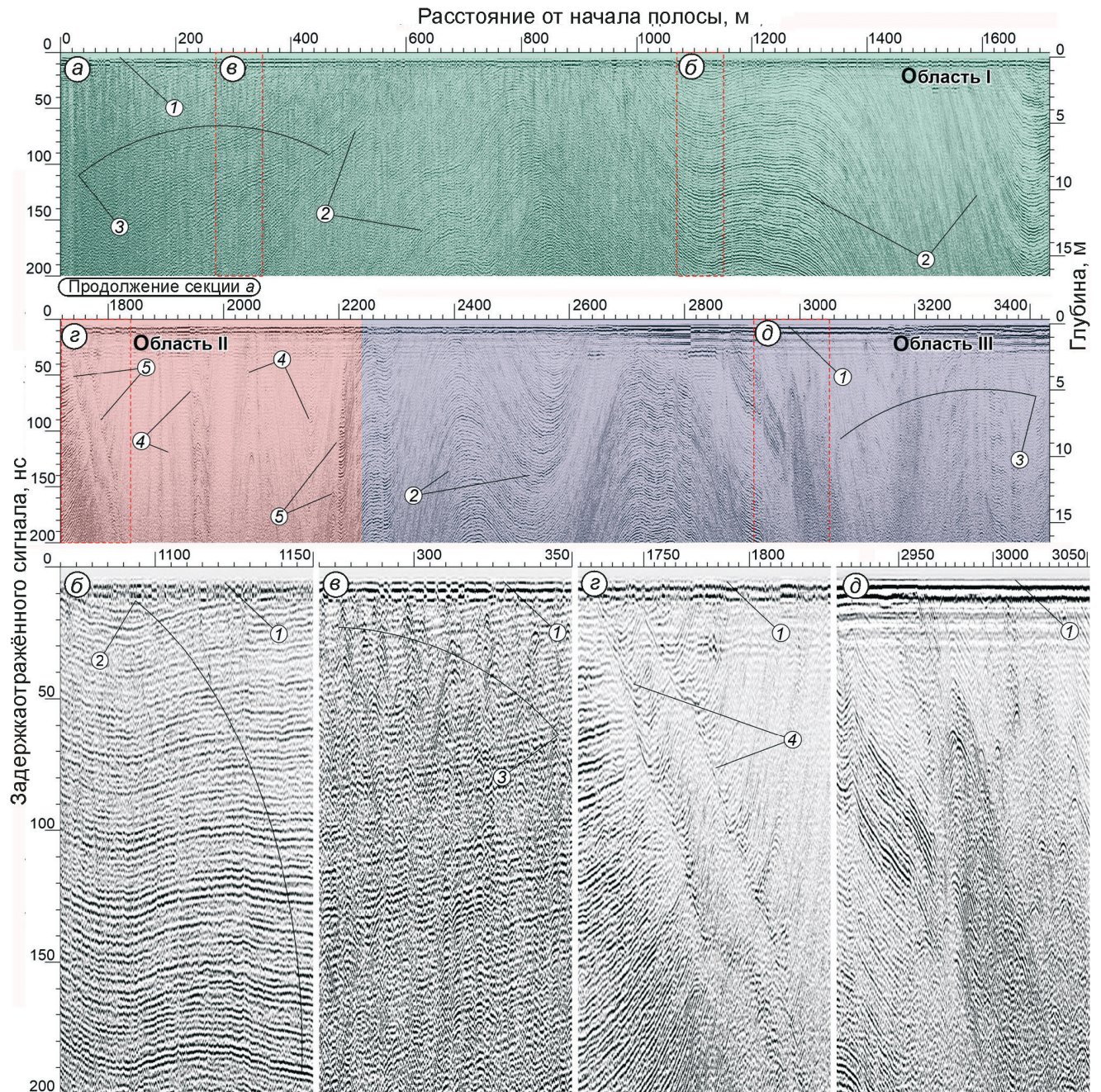


Рис. 4. Временные георадарные разрезы: *a* – георадарный разрез по маршруту NRW (положение маршрута показано на рис. 2); *б* – фрагмент временного разреза, демонстрирующий ненарушенное залегание слоёв; *в* – трещины в начале ВПП; *г* – фрагмент, демонстрирующий сочленение потоков; *д* – складки слоёв в конце взлётно-посадочной полосы; 1 – прямая волна; 2 – ненарушенные, субгоризонтальные или волнообразные внутренние слои в теле ледника; 3 – зоны «залеченных» трещин; 4 – сильно деформированные или смятые слои внутри ледника; 5 – зоны выраженных наклонных нарушений слоёв. Положение фрагментов временного разреза показано красным пунктиром. Зелёным цветом показана область I, красным – область II, синим – область III. Описание областей дано в тексте

Fig. 4. GPR time-sections: *a* – time-section along NRW profile (see location in fig. 2); *б* – a fragment of the time section showing the undisturbed occurrence of layers; *в* – crevasses at the start of the runway; *г* – a fragment with the conjunction of flows; *д* – folds of layers at the end of the runway; 1 – direct wave; 2 – undisturbed, subhorizontal or undulating inner layers into the glacier; 3 – zones of compressed crevasses; 4 – badly deformed or crumpled layers inside the glacier; 5 – zones of pronounced oblique faults in the layers. The location of the fragments of the time-section is shown by the red dotted rectangles. Zone I is depicted by green; zone II is depicted by red, and zone III is depicted by blue. See description of the zones in the text

ние от подлёдной поверхности не удалось из-за малой длины записи (максимальная развёртка составила 800 нс, что соответствует мощности ледника примерно 75 м). Закономерность и плавность слоёв указывают на равномерность течения ледника в этой области. Для наглядности волнообразная и трещиноватая структуры ледника показаны в более укрупнённом масштабе (см. рис. 4, б, в).

Для *второй области* характерны деформации и смятие слоёв внутри ледника 4 в отличие от предыдущего участка. Границы с соседними областями чётко выражены наклонными нарушениями 5 (см. рис. 4, а, з), что, вероятно, связано с контактом двух ледяных потоков. Их взаимодействие в краевых частях второй области деформирует, а в центральной разрушает внутреннюю структуру каждого из них. Поскольку открытых трещин на поверхности ледника как по результатам визуальных наблюдений, так и по геофизическим данным не обнаружено, предположено, что скорость течения потоков в этом месте незначительна. Вероятно, степень неравномерности скорости такова, что не создаются условия для возникновения напряжений выше предельных, которые приводили бы к образованию трещин. Иными словами: характер взаимодействия указанных потоков приводит лишь к пластическим деформациям.

Для изучения второй области выполнено два георадарных маршрута, расположенных параллельно друг другу к югу от ВПП, на расстоянии 500 (NRW500) и 700 м (NRW700) от неё, а также один профиль (NRW400) к северу. Их положение представлено на рис. 2. Возникающие снежные надувы вблизи балков, последующая их расчистка и укатка со временем привели к образованию довольно мощного слоя снега, достигающего местами 4 м. Граница, возникшая на контакте снежной толщи и ледника, оказалась интенсивным рефлексором, что привело к отражению большей части энергии электромагнитной волны. Лишь малая доля энергии проходит в нижележащие слои. Это делает разрез менее пригодным для комплексного анализа по сравнению с остальными, так как наиболее интересные участки, в частности центральная часть, оказались практически полностью маскированными. На рис. 5 представлены временные разрезы по маршруту вдоль оси ВПП (NRW), а

также NRW500, NRW700 и NRW400, ориентированные в соответствии с их истинным положением на местности.

На рис. 5 видно, что обсуждаемая вторая область уверенно регистрируется на всех трёх маршрутах с азимутом простираения $34^{\circ}40'$. Вероятно, она без видимых изменений простирается на значительные расстояния, определяя характер течения ледника в центральной части ВПП. Отмечено, что здесь располагаются перрон и балки аэродромного комплекса. Они находятся в относительной безопасности (трещины здесь не формируются) до тех пор, пока характер течения потоков остаётся неизменным. Полученные данные показывают, что ширина второй области постепенно уменьшается с 595 м на NRW700 до 550 м на NRW500 и 520 м на NRW.

Последняя, *третья область* по своему строению сходна с первой. Здесь наблюдаются волнообразные слои 2 и отсутствие каких-либо нарушений общего структурного плана. Лишь на участке последних 450 м ВПП рельефная слоистость осложняется дифрагированными волнами, которые сформированы залеченными трещинами. В её пределах присутствуют волнистые высокоамплитудные структуры, наблюдаемые на соседних маршрутах. Это позволяет определить направление движения ледника. Оно в целом совпадает с тем значением, которое получено на соседнем участке. Укрупнённый фрагмент одного из участков этой области показан на рис. 4, д.

Явно выраженный наклон волнистых структур и западной границы области II (см. рис. 4 а, з) однозначно указывает, что направление вектора скорости течения ледника в горизонтальной плоскости меняется не только с расстоянием, но и с глубиной. Подобный эффект инструментально зафиксирован по данным инклинометрии глубоких скважин, расположенных во внутренних районах Антарктиды (Марков, Котляков, 2006; Марков и др., 2016). Результаты математического моделирования для трёхмерного случая с применением приближения тонкого льда (SIA – Shallow Ice Approximation) также подтверждают это (Huybrechts, 1992; Рыбак, 2007; Greve, Blatter, 2009). Однако для приповерхностной части ледника до глубин в первые десятки метров при отсутствии явно выраженного физического препятствия подобные эффекты ранее не наблюдались.

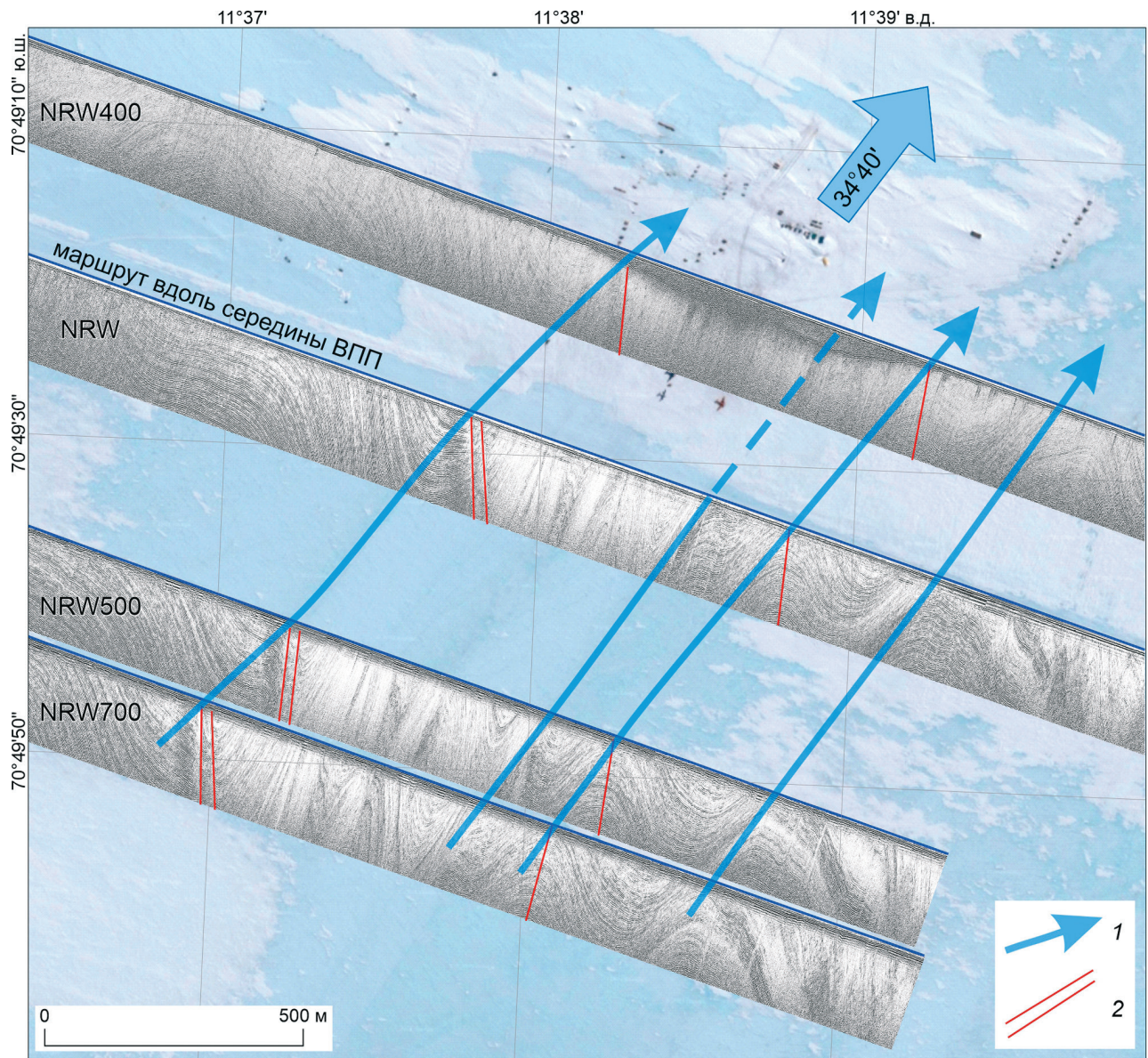


Рис. 5. Накладной монтаж, демонстрирующий простираие зоны сочленения потоков.
 1 – линии тока ледника; 2 – оси смещения слоёв в складках, демонстрирующие изменение направления течения ледника с глубиной

Fig. 5. Block montage demonstrating the extent of the flow junction zone.
 1 – ice flow lines; 2 – displacement axes of the layers in the folds, demonstrating the change in the direction of the glacier flow with depth

Деформации в теле ледника происходят при его неравномерном движении. Если они достаточно значительны, то могут быть инструментально измерены. Для большей наглядности на рис. 6, а представлена схема абсолютных деформаций за период между съёмками (42 сут.). Расчётные значения получены путём осреднения деформаций, измеренных на противоположных сторонах четырёхугольников, построенных по углам разметки ВПП. Длина знака пропорцио-

нальна модулю деформации. На рис. 6, б эта же схема представлена в укрупнённом виде и совмещена с фрагментом временного разреза. Измеренные значения деформаций и скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_l$ и $\dot{\epsilon}_T$ приведены в таблице.

Как следует из расчётов, скорости деформаций в продольном направлении (по отношению к оси ВПП) изменяются в пределах от $-0,008$ до $0,020 \text{ год}^{-1}$. Положительные значения соответствуют зонам растяжения, отрицательные –

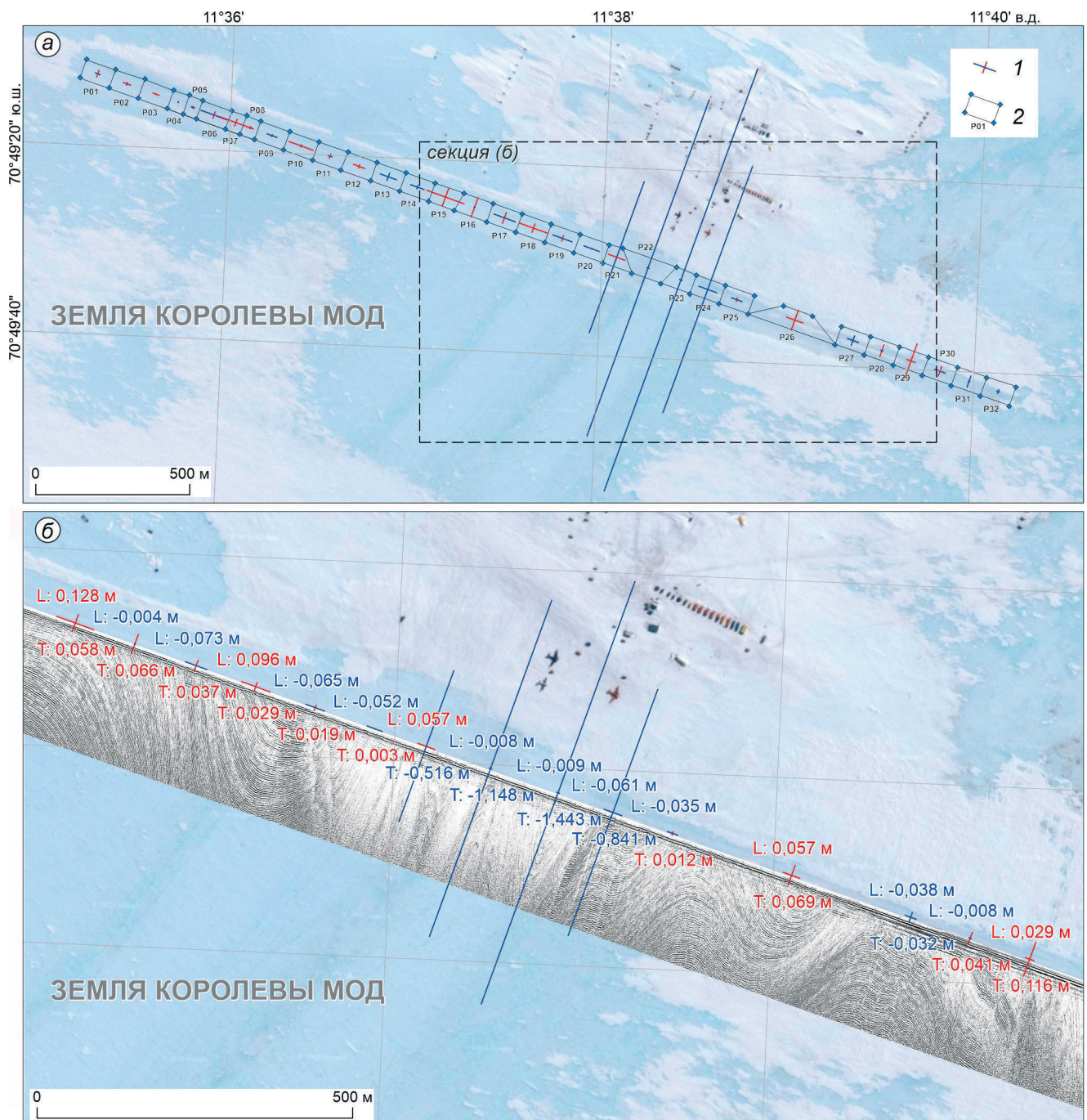


Рис. 6. Схема деформаций ледника в районе ВПП:

a – вдоль всей взлётно-посадочной полосы; *б* – укрупнённо на её центральном участке; *1* – величины деформаций ледника в различных направлениях; длина линий пропорциональна абсолютной величине деформаций в соответствующем направлении; линии красного цвета соответствуют положительным значениям (растяжение), синего – отрицательные (сжатие); *2* – полигоны, по которым рассчитывались деформации и их идентификатор. Цифрами на секции *б* показаны значения деформаций; *L* соответствует направлению вдоль оси ВПП, *T* – поперёк оси ВПП

Fig. 6. Deformation scheme of the glacier in the area of runway:

a – deformations along the runway; *б* – deformations are enlarged in the central section; *1* – the values of deformations of the glacier in different directions; the length of the lines is proportional to the absolute value of deformations in the corresponding direction; positive values (stretching) are red, negative values (compression) are blue; *2* – polygons for calculation of the deformations and their identifier. The numbers on section *b* are the values of deformations; *L* corresponds to the direction along the runway axis, *T* corresponds to the direction across the runway axis

Величины деформаций и скоростей деформаций полигонов вдоль ВПП

№	Идентификатор	Деформация		Скорость деформаций	
		поперечная ΔL_T , м	продольная ΔL_L , м	поперечная $\dot{\epsilon}_T$, год ⁻¹	продольная $\dot{\epsilon}_L$, год ⁻¹
1	P01	0,023	0,016	0,0032	0,0014
2	P02	-0,008	0,026	-0,0011	0,0023
3	P03	0,004	0,021	0,0005	0,0018
4	P04	0,004	-0,001	0,0006	-0,0002
5	P05	0,007	-0,011	0,0009	-0,0020
6	P06	0,022	-0,090	0,0030	-0,0078
7	P07	0,024	0,116	0,0032	0,0201
8	P08	0,007	0,020	0,0009	0,0036
9	P09	-0,006	-0,034	-0,0008	-0,0029
10	P10	-0,007	0,084	-0,0009	0,0073
11	P11	0,015	-0,014	0,0021	-0,0012
12	P12	0,012	0,040	0,0016	0,0034
13	P13	-0,025	-0,055	-0,0034	-0,0047
14	P14	-0,012	-0,045	-0,0016	-0,0039
15	P15	0,058	0,128	0,0078	0,0111
16	P16	0,066	-0,004	0,0090	-0,0003
17	P17	0,038	-0,073	0,0052	-0,0063
18	P18	0,029	0,096	0,0041	0,0084
19	P19	0,019	-0,065	0,0026	-0,0056
20	P20	0,003	-0,052	0,0005	-0,0045
21	P21	-0,516	0,057	-0,0521	0,0096
22	P22	-1,148	-0,008	-0,1260	-0,0006
23	P23	-1,443	-0,009	-0,1831	-0,0007
24	P24	-0,841	-0,061	-0,1134	-0,0053
25	P25	0,012	-0,035	0,0017	-0,0031
26	P26	0,069	0,057	0,0051	0,0012
27	P27	-0,032	-0,038	-0,0044	-0,0033
28	P28	0,041	-0,008	0,0056	-0,0007
29	P29	0,116	0,029	0,0160	0,0025
30	P30	0,033	-0,036	0,0046	-0,0031
31	P31	-0,037	0,005	-0,0052	0,0005
32	P32	-0,012	-0,010	-0,0015	-0,0008

зонам сжатия. Наибольшие абсолютные значения наблюдаются в интервале расстояний от 400 до 800 м и от 1200 до 1900 м от начала ВПП. При этом участки, на которых происходит растяжение, естественным образом сменяются зонами, на которых наблюдается сжатие. Скорости деформаций в поперечном направлении изменяются в более широких пределах: от -0,183 до 0,016 год⁻¹, что существенно больше, чем в продольном. Это вполне объяснимо, поскольку направление генерального движения ледника субортогонально оси ВПП. На это указывают как геодезические данные инструментальных наблюдений, в частности сотрудников АО «Аэрогеодезия», так и материалы георадарного профилирования. Измерения вдоль

линий тока ледника весьма малочисленны и ограничиваются лишь взлётно-посадочной полосой. На момент выполнения полевых работ из-за организационных причин и особенностей функционирования посадочной площадки иной возможности не было. Между тем ледник движется неравномерно, и зоны растяжения сменяются зонами сжатия. Таким образом, в сотне метров от ВПП, ниже или выше по течению ледника, зоны сжатия логичным образом сменяются зонами растяжения по аналогии с тем, что наблюдается по профилю, расположенному вдоль оси ВПП субортогонально линиям тока.

Зона максимальных по модулю скоростей деформаций в поперечном направлении распола-

гается в интервале расстояний 1800–2200 м, что полностью соответствует области II, определяемой по георадарным данным как участок слияния двух ледниковых потоков. Такой взгляд на характер течения ледника вполне согласуется со схемой скоростей деформаций.

Оценены полученные результаты с позиций прогноза формирования зон трещин. Напряжение в леднике σ связано со скоростью деформаций $\dot{\epsilon}$ законом Глена (Glen, 1952),

$$\dot{\epsilon} = A_n \sigma^n,$$

где n – некоторый параметр равный трём (Huysbrechts, 1992; Рыбак, 2007; Greve and Blatter, 2009); A_n – параметр растекания.

Однако сам Джон Глен в своей работе (Glen, 1952) применял $n = 4$. Параметр растекания A_n , который, считается величиной обратной динамической вязкости, зависит от температуры (Huysbrechts, 1992; Рыбак, 2007; Greve, Blatter, 2009). Таким образом, определение величины напряжения в реальном леднике – сложная задача. Между тем именно она – первопричина возникновения деформаций и в конечном итоге формирования трещин (Партон, Морозов, 1985; Каркашадзе, 2004). В научных публикациях по данной тематике приводятся предельные напряжения и скорости деформаций, но при этом отмечается, что для разных ледников они различны. Это понятно, поскольку данные величины, будучи зависимы от вязкости, зависят и от температуры, и от особенностей строения ледника. В работе (Hambrey, Müller, 1978) трещины наблюдались в районах со скоростью деформаций всего $0,004 \text{ год}^{-1}$. Однако в областях со значениями, бóльшими на порядки ($0,163 \text{ год}^{-1}$), они не зарегистрированы, что кажется странным и показывает, насколько непроста задача выявления областей потенциального формирования трещин.

В обзорной работе (Colgan et al., 2016) на рис. 6, *b* приводится зависимость пороговой скорости деформации от температуры в приповерхностной 10-метровой толще ледника. Моделирование процесса распространения тепла в толще ледника показывает, что температура в этом слое полностью контролируется приповерхностными температурными изменениями. Согласно метеорологическим данным на сайте ААНИИ, для холодного зимнего периода они составляют в среднем от -20 до -15 °С, а в тёплые летние меся-

цы – около -10 °С. Это подтверждается данными термометрии: температура на глубине более 1,5 м в конце весны (первые числа ноября) стабильно регистрировалась в интервале от -15 до -17 °С. Таким образом, согласно работе (Colgan et al., 2016), минимальные предельные скорости деформации для зимнего периода составляют примерно $0,05 \text{ год}^{-1}$, а для тёплого – около $0,02 \text{ год}^{-1}$.

В результате полученные значения в продольном направлении весьма близки к пороговым (см. рис. 6 и таблицу), а в поперечном направлении значительно их превосходят. Тот факт, что бóльшие величины скорости деформаций в поперечном направлении отрицательны, указывает на процессы сжатия и не должен вводить в заблуждение. Зоны сжатия должны сменяться зонами растяжения сходной интенсивности, а их отсутствие указывает лишь на то, что район недостаточно изучен и не охвачен в должной мере тахеометрической съёмкой. В области II, скоро вполне могут начать формироваться трещины. Наиболее вероятный участок располагается в интервале расстояний от 1800 до 2200 м от начала ВПП.

Открытым остаётся вопрос о том, почему трещины ни визуально, ни инструментально (на временном георадарном разрезе) не наблюдаются в центральной части ВПП, где регистрируются наибольшие скорости деформаций. Наоборот, они присутствуют в начале и в конце ВПП, где напряжения существенно меньше. На момент подготовки статьи у авторов нет окончательного ответа на этот вопрос. Предположено, что характер течения ледника относительно недавно был другим, несколько медленнее, чем в настоящее время. Такое возможно, если среднегодовая температура его толщи возросла бы и превысила -10 °С. Авторы не застали периода антарктического лета, а их температурные измерения выполнялись в конце весны, т.е. в ещё холодное время года. Температура -10 °С считается пороговой. Начиная с неё, механические свойства ледника существенно меняются. В частности, резко возрастает параметр растекания A_n . Он пропорционален масштабному множителю A_0 , который при температуре ниже -10 °С принимает значение $1,14 \cdot 10^{-5} \text{ Па}^{-3} \text{ год}^{-1}$, а выше неё – $5,4 \cdot 10^{10} \text{ Па}^{-3} \text{ год}^{-1}$, т.е. его рост превышает 15 порядков! С ростом температуры возрастают и другие параметры, входящие в A_n (Huysbrechts, 1992; Рыбак, 2007; Greve and Blatter, 2009). Это не приведёт к увеличению скорости де-

формаций ледника на 15 порядков, просто ледник будет растекаться быстрее. Данный механизм хорошо описывается моделью тепломассопереноса, изложенной в работах (Huybrechts, 1992; Рыбак, 2007; Greve and Blatter, 2009).

Результаты полевых работ стали несколько неожиданными, поскольку они полагали, что участок ледника, на котором организована ВПП станции Новолазаревская, достаточно стабилен. Возможно, так оно и было раньше, но полученные данные указывают, что характер движения ледника мог измениться. Проведённые инженерные изыскания были достаточно масштабны, они всё-таки охватывают весьма короткий период наблюдений – примерно полтора месяца, причём межсезонья. Поэтому эти работы необходимо продолжить, по крайней мере, ещё на один полевой сезон, чтобы не только получить более точные данные, но и попробовать установить тенденции изменения динамики ледника.

Заключение

Комплексные инженерные изыскания на посадочной площадке станции Новолазаревская позволили выявить особенности строения ледника, а также инструментально с высокой точностью измерить скорости его деформаций. На основе полученных данных можно сделать ряд выводов.

1. Большая часть взлётно-посадочной полосы располагается в области малых значений деформаций. Ледник здесь с чётко выраженной слоистой ненарушенной структурой. Трещины и любые другие неоднородности отсутствуют.

2. Краевые части ВПП, примерно первые и последние 300 м, характеризуются наличием не-

крупных, до 15 см в поперечнике, залеченных трещин. Они чётко фиксируются на временных георадарных разрезах в виде обилия дифрагированных волн, а также прослеживаются визуально на открытых участках ледника. Будучи залеченными, что подтверждено бурением и визуальными наблюдениями, такие трещины не представляют опасности, исключая периоды обильного таяния.

3. Наиболее неоднозначна центральная часть посадочной площадки, демонстрирующая максимальные скорости деформаций и выделяющаяся крупными вертикальными структурами на временных георадарных разрезах, полученных по профилям как вдоль ВПП, так и к югу, и к северу от неё. Однако трещины в приповерхностной части в этой области на момент выполнения работ не зафиксированы. Тем не менее, именно эта часть посадочной площадки наиболее важна с точки зрения безопасности, а также интересна с точки зрения динамики ледника, что указывает на необходимость мониторинга её состояния в будущем.

Благодарности. Авторы выражают благодарность С.В. Межонову (РАЭ) за логистическую помощь в проведении полевых изысканий, а также Д.В. Фёдорову (АО «Аэрогеодезия») за консультации и предоставление данных о плановом положении ВПП. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда № 22–27–00266.

Acknowledgments. The authors are grateful to S.V. Mezhonov (RAE) for logistical assistance of the fieldwork, as well as D.V. Fedorov (JSC «Aerogeodeziya») for consultations and providing data on the location of the runway. The study was financially supported by the Russian Science Foundation № 22–27–00266.

Литература

- Владов М.Л., Золотарев В.П., Старовойтов А.В. Методическое руководство по проведению георадиолокационных исследований. М.: ГСД Продакшен, 1997. 66 с.
- Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во МГУ, 2004. 153 с.
- Каркашадзе Г.Г. Механическое разрушение горных пород. М.: Изд-во МГУ, 2004. 222 с.
- Лукин В.В. Современные проблемы и перспективы деятельности России в Антарктике // Тр. ВНИРО. 2015. Вып. 156. С. 178–196.

References

- Vladov M.L., Zolotarev V.P., Starovoytov A.V. *Metodicheskoe rukovodstvo po provedeniyu georadiolokatsionnykh issledovaniy*. Methodological guide for carrying out georadar research. M.: GDS Production, 1997: 66 p. [In Russian].
- Vladov M.L., Starovoytov A.V. *Vvedenie v georadiolokatsiyu*. Introduction to GPR. M.: MSU, 2004: 153 p. [In Russian].
- Karkashadze G.G. *Mekhanicheskoe razrushenie gornyyh porod*. Mechanical destruction of rocks. M.: MSU, 2004: 222 p. [In Russian].

- Марков А.Н., Dahl-Jensen D., Котляков В.М., Голубев В.Н., Леонов М.Г., Лукин В.В. Динамика покровных ледников Антарктиды и Гренландии по результатам скважинных, радиолокационных и космических наблюдений // *Лёд и Снег*. 2016. Т. 56. № 3. С. 309–332.
- Марков А.Н., Котляков В.М. Особенности динамики ледникового покрова Восточной Антарктиды // *ДАН*. 2006. Т. 411. № 3. С. 410–413.
- Мартьянов В.Л. Работы 66-й сезонной Российской антарктической экспедиции // *Российские полярные исследования*. 2021. Т. 45. № 3. С. 7–8.
- Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
- Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. М.: Наука, 1985. 504 с.
- Поляков С.П., Мартьянов В.Л., Лукин В.В. Снежно-ледовые взлетно-посадочные полосы Российской антарктической экспедиции – особенности подготовки и перспективы развития // *Российские полярные исследования*. 2015. Т. 20. № 2. С. 31–35.
- Попов С.В., Боронина А.С. Программное обеспечение для обработки данных тахеометрической съёмки // *Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры*. Наука и образование. Сб. материалов III Всерос. науч.-практ. конф. 6–8 ноября 2019 г. СПб., 2019. С. 258–263.
- Попов С.В., Кашкевич М.П., Боронина А.С. Комплексные инженерные изыскания в оазисе Ширмахера (Земля Королевы Мод, Восточная Антарктида) в сезон 67-й РАЭ // *Российские полярные исследования*. 2022. Т. 47. № 1. С. 12–16.
- 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., Мартьянов В.Л., Лукин В.В. Строение верхней части ледника в районе планируемой взлётно-посадочной полосы станции Мирный, Восточная Антарктида (по материалам работ 2014/15 года) // *Криосфера Земли*. 2017. Т. XXI. № 1. С. 73–84.
- Попов С.В., Эберляйн Л. Опыт применения георадара для изучения строения снежно-фирновой толщи и грунта Восточной Антарктиды // *Лёд и Снег*. 2014. Т. 54. № 4. С. 95–106. doi: 10.15356/2076-6734-2014-4-95-106.
- Рыбак О.О. Математическое моделирование ледникового щита Антарктиды: теория, эксперименты и приложения в палеореконструкциях. М.: Физматлит, 2007. 223 с.
- Саватюгин Л.М., Преображенская М.А. Российские исследования в Антарктике. Т. 2. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. 288 с.
- Lukin V.V. Current Problems and Perspectives of Activity of the Russia in the Antarctic. *Trudy VNIRO*. Trudy VNIRO. 2015, 156: 178–196. [In Russian].
- Markov A.N., Dahl-Jensen D., Kotlyakov V.M., Golubev V.N., Leonov M.G., Lukin V.V. Dynamics of Antarctic and Greenland ice sheets using the borehole, radio sounding and space observations. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (3): 309–322. [In Russian].
- Markov A.N., Kotlyakov V.M. Specific features of the ice sheet dynamics in Eastern Antarctica. *Doklady Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2006, 411 (3): 410–413. [In Russian].
- Mart'yanov V.L. Works of the 66th seasonal Russian Antarctic Expedition. *Rossiyskie polyarnye issledovaniya*. Russian polar research. 2021, 45 (3): 7–8. [In Russian].
- Macheret Y.Y. *Radiozondirovanie lednikov*. Radio echo-sounding of glaciers. M.: Nauchny Mir, 2006: 392 p. [In Russian].
- Parton V.Z., Morozov E.M. *Mehanika uprugoplasticheskogo razrusheniya*. Mechanics of elastoplastic fracture. M.: Nauka, 1985: 504 p. [In Russian].
- Polyakov S.P., Mart'yanov V.L., Lukin V.V. Snow-ice runways of the Russian Antarctic Expedition, features of preparation and development prospects. *Rossiyskie polyarnye issledovaniya*. Russian polar research. 2015, 20 (2): 31–35. [In Russian].
- Popov S.V., Boronina A.S. Software for processing tacheometric survey data. *Geodeziya, kartografiya, geoinformatika i kadastry*. Nauka i obrazovanie. Sb. materialov III Vseros. nauch.-prakt. konf. 6–8 noyabrya 2019 g. Materials of the III Russian Conference on Applied Science «Geodesy, cartography, geoinformatics and cadastre. From idea to application». 2019: 258–263. [In Russian].
- Popov S.V., Kashkevich M.P., Boronina A.S. Engineering surveys in the Schirmacher Oasis (Dronning Maud Land, East Antarctica) in the 67th RAE. *Rossiyskie polyarnye issledovaniya*. Russian polar research. 2022, 47 (1): 12–16. [In Russian].
- 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., Mart'yanov V.L., Lukin V.V. The structure of the upper part of the glacier in the area of a snow-runway of Mirny Station, East Antarctica (based on the data collected in 2014/15 field season). *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2017, XXI (1): 73–84. [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, 54 (4): 95–106. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2014-4-95-106.
- Rybak O.O. *Matematicheskoe modelirovanie lednikovogo shchita Antarktidy: teoriya, eksperimenty i prilozheniya v paleorekonstruktsiyah*. Mathematical modeling of the ice sheet of

- Colgan W., Rajaram H., Abdalati W., McCutchan C., Mottram R., Moussavi M.S., Grigsby S. Glacier crevasses: Observations, models, and mass balance implications // *Review Geophys.* 2016. V. 54. № 1. P. 119–161. doi: 10.1002/2015RG000504.
- Glen J. Experiments on the deformation of ice // *Journ. of Glaciology.* 1952. V. 2. № 12. P. 111–114. doi: 10.3189/S0022143000034067.
- González-Velázquez J.L. *A Practical Approach to Fracture Mechanics.* Elsevier, 2021. 274 p.
- Greve R., Blatter H. *Dynamics of ice sheets and glaciers.* Springer Science & Business Media, 2009. 300 p.
- Hambrey M.J., Müller F. Structures and ice deformation in the White Glacier, Axel Heiberg Island, North West Territories, Canada // *Journ. of Glaciology.* 1978. V. 20. № 82. P. 41–66. doi: 10.3189/S0022143000021213.
- Huybrechts P. The Antarctic ice sheet and environmental change: a three-dimensional modelling study. *Ber. Polarforsch.* 1992. № 99. 244 p.
- Ice runway in the area of Novolazarevskaya Station. Initial environmental evaluation. XXV ATCM. Working Paper WP-015. 2001. 40 p.
- Inagaki O. Legal Issues concerning DROMLAN under the Antarctic Treaty System // *Yearb. Polar Law Online.* 2020. V. 12. № 1. P. 61–74. doi: 10.1163/22116427_012010006.
- Jennings S.J.A., Hambrey M.J. Structures and deformation in glaciers and ice sheets // *Rev. of Geophys.* 2021. V. 59. № 3. e2021RG000743. doi: 10.1029/2021RG000743.
- Jol H.M. *Ground penetrating radar: Theory and applications.* Elsevier, 2009. 543 p.
- Markov A., Polyakov S., Sun B., Lukin V., Popov S., Yang H., Zhang T., Cui X., Guo J., Cui P., Zhang L., Greenbaum J., Mirakin A., Voyevodin A., Boronina A., Sukhanova A., Dshovykh G., Krekhov A., Zarin S., Semyonov A., Soshchenko V., Mel'nik A. The conditions of the formation and existence of «Blue Ice Areas» in the ice flow transition region from the Antarctic ice sheet to the Amery Ice Shelf in the Larsemann Hills area // *Polar Sci.* 2019. V. 22. P. 100478. doi: 10.1016/j.polar.2019.08.004.
- Nye J.F. A method of determining the strain-rate tensor at the surface of a glacier // *Journ. of Glaciology.* 1959. V. 3. № 25. P. 409–419.
- Pook L.P. *Linear elastic fracture mechanics for engineers: theory and applications.* WIT Press, Southampton, Boston, UK, 2000. 161 p.
- Antarctica: theory, experiments and applications in paleo-reconstructions. M.: Fizmatlit, 2007: 223 p. [In Russian].
- Savatyugin L.M., Preobrazhenskaya M.A. *Rossiyskie issledovaniya v Antarktike.* Russian research in Antarctica. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 2000: 288 p. [In Russian].
- Colgan W., Rajaram H., Abdalati W., McCutchan C., Mottram R., Moussavi M.S., Grigsby S. Glacier crevasses: Observations, models, and mass balance implications. *Rev. Geophys.* 2016, 54 (1): 119–161. doi: 10.1002/2015RG000504.
- Glen J. Experiments on the deformation of ice. *Journ. of Glaciology.* 1952, 2 (12): 111–114. doi: 10.3189/S0022143000034067.
- González-Velázquez J.L. *A Practical Approach to Fracture Mechanics.* Elsevier. 2021: 274.
- Greve R., Blatter H. *Dynamics of ice sheets and glaciers.* Springer Science & Business Media, 2009: 300 p.
- Hambrey M.J., Müller F. Structures and ice deformation in the White Glacier, Axel Heiberg Island, North West Territories, Canada. *Journ. of Glaciology.* 1978, 20 (82): 41–66. doi: 10.3189/S0022143000021213.
- Huybrechts P. The Antarctic ice sheet and environmental change: a three-dimensional modelling study. *Ber. Polarforsch.* 1992, 99: 244 p.
- Ice runway in the area of Novolazarevskaya Station. Initial environmental evaluation. XXV ATCM, 2001. Working Paper WP-015. 2001: 40 p.
- Inagaki O. Legal Issues concerning DROMLAN under the Antarctic Treaty System. *Yearb. Polar Law Online.* 2020, 12 (1): 61–74. doi: 10.1163/22116427_012010006.
- Jennings S.J.A., Hambrey M.J. Structures and deformation in glaciers and ice sheets. *Rev. of Geophys.* 2021, 59 (3): e2021RG000743. doi: 10.1029/2021RG000743.
- Jol H.M. *Ground penetrating radar: Theory and applications.* Elsevier, 2009: 543 p.
- Markov A., Polyakov S., Sun B., Lukin V., Popov S., Yang H., Zhang T., Cui X., Guo J., Cui P., Zhang L., Greenbaum J., Mirakin A., Voyevodin A., Boronina A., Sukhanova A., Dshovykh G., Krekhov A., Zarin S., Semyonov A., Soshchenko V., Mel'nik A. The conditions of the formation and existence of «Blue Ice Areas» in the ice flow transition region from the Antarctic ice sheet to the Amery Ice Shelf in the Larsemann Hills area. *Polar Sci.* 2019, 22: 100478. doi: 10.1016/j.polar.2019.08.004.
- Nye J.F. A method of determining the strain-rate tensor at the surface of a glacier. *Journ. of Glaciology.* 1959, 3 (25): 409–419.
- Pook L.P. *Linear elastic fracture mechanics for engineers: theory and applications.* WIT Press, Southampton, Boston, UK. 2000: 161.