

НОВЫЕ ДАННЫЕ О СТРОЕНИИ И ДВИЖЕНИИ ЛЕДНИКА В РАЙОНЕ ПОСАДОЧНОЙ ПЛОЩАДКИ СТАНЦИИ НОВОЛАЗАРЕВСКАЯ (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА)

© 2024 г. А. С. Боронина^{1*}, М. П. Кашкевич², С. В. Попов^{3,2},
Е. М. Михайлов², А. Е. Дружин²

¹Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: al.b.s@yandex.ru

Поступила 11.05.2024 г.

После доработки 14.06.2024 г.

Принята к печати 08.07.2024 г.

Представлен комплексный анализ геодезических и георадарных данных, полученных при проведении работ в районе посадочной площадки станции Новолазаревская в летний сезон 2023/24 г. Выполненные изыскания позволили уточнить особенности строения ледника, а также инструментально с высокой точностью измерить его деформации. В пределах взлётно-посадочной полосы были выделены три области, отличающиеся по степени необходимости их регулярного мониторинга, а анализ данных о смещении знаков разметки полосы с октября 2021 г. по февраль 2024 г. позволил сделать вывод о неравномерности движения ледника.

Ключевые слова: опасные гляциологические явления, ледниковые трещины, движение ледника, георадарное профилирование, посадочная площадка станции Новолазаревская, Восточная Антарктида

DOI: 10.31857/S2076673424030065, EDN: INZZAF

ВВЕДЕНИЕ

Антарктида — одно из самых недоступных мест на нашей планете. Это самый холодный континент, бесперебойный доступ к которому ограничен удалённостью его местоположения и экстремальными погодными условиями. Большинство посещений Антарктиды осуществляется экспедициями стран-участниц Договора об Антарктике для выполнения круглогодичных и сезонных научных исследований и поддержания зимовочных станций и полевых баз исключительно в навигационный период. Оптимальным и наиболее быстрым вариантом её связи с другими материками является воздушный транспорт. Зачастую именно авиационное сообщение играет определяющую роль в обеспечении логистической поддержки полярных станций, баз и выносных лагерей для всего международного антарктического сообщества. Особенно сильно зависят от полётов внутриконтинентальные районы из-за очень короткого периода благоприятных погодных условий для доставки участников зимовочного и сезонного составов или груза. В настоящее время в Антарктиде имеется более 50 посадочных

площадок, которые принадлежат более чем 20 государствам (Поляков и др., 2015). Их наибольшее количество насчитывается у Соединённых Штатов Америки, Австралии, Аргентины и Италии. Принимать тяжёлые самолёты на колёсном шасси, совершающие трансконтинентальные перелёты, способны лишь 11 взлётно-посадочных полос (ВПП) Антарктиды.

У Российской Федерации снежные или ледовые посадочные площадки имеются на четырёх антарктических станциях: Восток, Прогресс, Новолазаревская и Мирный, а также на сезонной полевой базе Молодёжная. В настоящее время обеспечить приём тяжёлых самолётов на колёсном шасси могут только посадочная площадка станции Новолазаревская и новая посадочная площадка Зенит в районе станции Прогресс (Попов и др., 2022; Александров и др., 2023; Суханова и др., 2023). Взлётно-посадочная полоса первой из них имеет в качестве покрытия «голубой лёд», а вторая — снежно-фирновую толщу. Учитывая сложность создания и поддержки снежных ВПП для тяжёлых колёсных самолётов (Ключников, 2006; Поляков и

др., 2009; Попов и др., 2016, White, McCallum, 2018), альтернативные варианты крайне ценны. У нашей страны это только посадочная площадка станции Новолазаревская (Novo Runway). Она располагается на ледниковом куполе Земли Королевы Мод (Dronning Maud Land) примерно в 7 км от оазиса Ширмахера (Schirmacher Oasis) и носит статус крупнейшего транспортного узла, поддерживающего межконтинентальную воздушную связь между Кейптауном и пунктами назначений в пределах Земли Королевы Мод (Лукин, 2015). Обслуживают эту посадочную площадку аэродромная группа Российской антарктической экспедиции и сотрудники международного антарктического логистического центра Ultima Antarctic Expeditions (ALCI до 2023 г.). Длина взлётно-посадочной полосы составляет 3000 м при ширине 60 м. Её расположение на участке «голубого льда» обеспечивает жёсткое покрытие и не требует длительных, технически сложных и затратных подготовительных работ. Именно по этой причине малочисленные зоны «голубого льда» представляют большой интерес для логистического обеспечения антарктических исследований (Mellor, 1988; Поляков, 2015; Markov et al., 2019). Всего в Антарктиде насчитывается лишь шесть взлётно-посадочных полос, организованных на «голубом льду» и принимающих самолёты на колёсном шасси: Troll Airfield (Норвегия), Wilkins Runway (Австралия), Novo Runway (Россия), Perseus Airstrip (Бельгия), Union Glacier Blue-Ice Runway (США) и Wolfs Fang Runway (Великобритания).

При всех преимуществах посадочная площадка станции Новолазаревская в силу своего местоположения на леднике подвержена различным гляциологическим процессам, связанным с его динамикой. Естественное неравномерное движение ледника приводит как к формированию приповерхностных трещин, так и к изменению конфигурации взлётно-посадочной полосы. Ярким примером служит её дугообразное искривление, требовавшее корректировки осевых знаков разметки в 2021 г. (Мартыанов, 2021). Исходя из этого, для гарантирования безопасности полётов в Антарктиде огромную роль играет не только надёжное метеорологическое обеспечение, но и состояние самой ледовой или снежной взлётно-посадочной полосы, боковых полос и концевых зон безопасности. Следовательно, выявление степени неравномерности течения ледника, влияющего на эксплуатацию взлётно-посадочной полосы из-за возможного формирования трещин как в её пределах, так и в близлежащей области по всему периметру, является актуальной и важной задачей. Первые подобные работы на посадочной площадке станции Новолазаревская, заложившие основу для дальнейшего мониторинга, были выполнены авторами в октябре–декабре 2021 г. (Попов и др., 2022). Спустя два года исследования здесь были продолжены

и проводились в наиболее тёплые месяцы – с декабря 2023 г. по февраль 2024 г.

Цель настоящей работы заключается в анализе строения ледника непосредственно вдоль взлётно-посадочной полосы и на удалении 1.5 км от неё в южном направлении для локализации области сочленения ледовых потоков и выявления участков, требующих наиболее тщательного мониторинга, а также в определении степени пространственной неравномерности течения ледника посредством расчёта скоростей его деформаций за два года исследований.

КРАТКИЙ ОБЗОР ИЗУЧЕНИЯ РАЙОНОВ ПОСАДОЧНЫХ ПЛОЩАДОК АНТАРКТИДЫ

Районы посадочных площадок и состояние взлётно-посадочных полос Антарктиды изучаются уже с середины прошлого века. К примеру, антарктическим летом 1965/66 г. в ходе исследования западной части шельфового ледника Мак-Мердо для поиска участка под строительство нового аэродрома были замечены локальные подповерхностные скопления талой воды. Не оценив их масштабность, там было начато строительство аэродрома «Аутер-Уильямс Филд» (Outer Williams Field). Однако уже в ходе строительных работ было обнаружено, что эти водоёмы простираются по всей предполагаемой территории взлётно-посадочной полосы и представляют серьёзную опасность для воздушных судов (Paige, 1968). Во избежание повторения подобных ситуаций были начаты изыскания для их локализации, а также выяснения причин формирования таких водоёмов. Было установлено, что они располагаются исключительно под участками «голубого льда» и не прослеживаются при визуальном осмотре. Глубина скоплений воды достигала 1.5 м, а толщина льда над ними уменьшалась с 30–40 см в декабре до 7 см к середине января, что создавало опасность для полётов (Paige, 1968). Благодаря выполненным работам решение по снижению подповерхностного таяния было найдено и взлётно-посадочная полоса «Аутер-Уильямс Филд» была подготовлена к использованию.

В районе аэродрома Пегас (Pegasus Field), расположенного на шельфовом леднике Росса, георадарные исследования на частоте 500 МГц позволили обнаружить области нарушений сплошности ледниковой толщи (Argcone, 1996). Анализ данных показал, что на глубине до 3.5 м от дневной поверхности залегает водный слой, который простирается на расстояние около 40 м. Взлётно-посадочная полоса аэродрома Пегас располагалась на «голубом льду» и долгое время обслуживала тяжёлые колёсные самолёты. Однако в декабре 2016 г. она была закрыта из-за чрезмерно интенсивного таяния в летний сезон, вызванного повышенными температурами воздуха в сочетании с пылью чёрной

вулканической породы, принесённой с близлежащего Чёрного острова (Black Island).

Исследования состояния ледника и снежно-фирновой толщи проводилось также на аэродроме Уильямс (Williams Field), расположенном на шельфовом леднике Росса. Одна из задач работ состояла в локализации разлива топлива, просочившегося в снежный покров. В исследовании использовались георадары с антеннами 100 и 400 МГц (Arcone et al., 1994). На основании полученных данных авторы не смогли окончательно подтвердить, сконцентрировано или рассеяно топливо в снегу. Однако на трассе между аэродромами Уильямс и Пегас георадарное профилирование позволило изучить структуру ледника и на предмет его растрескивания с целью обнаружения опасных трещин. На радарограммах, полученных вдоль трассы, не было отмечено дифрагированных волн, которые могли бы указывать на трещины внутри шельфового ледника. Благодаря этому трассу между авиационными транспортными узлами признали безопасной (Arcone et al., 1994).

А в работе (Urbini et al., 2019) описывается обширный комплекс исследований, включающий в себя фотограмметрию, георадарное профилирование, геодезические измерения, анализ данных InSAR, проводившийся в районе строящейся взлётно-посадочной полосы у итальянской сезонной станции Марио Цуккелли (Mario Zucchelli Station) в районе залива Терра-Нова в Восточной Антарктиде. Анализ данных был направлен на оценку строения ледника Болдер-Клэй (Boulder Clay Glacier), тенденций его деформации и общего смещения поверхности в краткосрочной и долгосрочной перспективе. Было выяснено, что скорости смещений ледника составляют не более 74 мм/год, а георадарные данные выявили наличие воды на ложе ледника. Поскольку температура на нём (120 м от поверхности) оценивалась примерно в -14°C , то это указывало на возможное наличие водоёма повышенной солёности. Все полученные результаты учитывались при строительстве ВПП.

Состояние взлётно-посадочных полос приходилось исследовать и в связи с климатическими изменениями. К примеру, в работе (Rivera et al., 2005) сообщалось об ухудшении поверхности ВПП «Fuchs Ice Piedmont», расположенной на Антарктическом полуострове, из-за всё более раннего наступления летнего таяния. Эта взлётно-посадочная полоса представляла собой перекрытый снегом ледник, использовавшийся с 1960-х годов для авиационного обеспечения британских и чилийских логистических операций. Для составления схемы трещин и полей скоростей льда, а также поверхностного и подлёдного рельефа местности авторами были проанализированы данные радиолокационного профилирования, геодезической съёмки, карт совместно со спутниковыми и аэрофотоснимками. Результаты показали, что

территория взлётно-посадочной полосы расположена на локальном ледоразделе, окружённом трещинами, которые постепенно появляются на поверхности ледника летом, предположительно, из-за более интенсивного таяния снега и, возможно, более высоких скоростей движения льда в связи с общим потеплением региона. Отмечалось, что при сохранении этой тенденции сложившаяся ситуация существенно повлияет на полёты и в перспективе придётся искать новый участок для переноса посадочной площадки на более значительную высоту (Rivera et al., 2005).

Посадочная площадка станции Новолазаревская – не единственный отечественный авиационный транспортный узел, где проводилось изучение строения ледника и его динамики. Подобные комплексные работы выполнялись также в районе станции Мирный (побережье моря Дейвиса, Восточная Антарктида), для которого характерны многочисленные трещины. В задачи исследования входило изучение строения и динамики ледника для возобновления авиационного сообщения с этой станцией после многолетнего перерыва (Поляков и др., 2015). По результатам георадарного профилирования, кернового бурения, аэрофотосъёмки и наблюдения за гляциологическими вехами было установлено, что на данной территории развиты трещины преимущественно шириной до 150 см, перекрытые мостами сильно фирнизированного снега мощностью более 1 м. При их заблаговременном обнаружении они не представляли опасности, так как могли быть легко заделаны. В феврале 2016 г. посадочная площадка была подготовлена и авиасообщение возобновлено (Попов и др., 2016). Стоит также отметить изыскания, выполненные для обеспечения безопасности транспортных операций в районе полевой базы Русская в Западной Антарктиде, с которой в ближайшее время планируется восстановить авиационное сообщение. Проведённая георадарная съёмка позволила обнаружить крупные трещины и определить безопасный район для организации взлётно-посадочной полосы (Суханова и др., 2022).

Другими не менее важными изысканиями стали работы по локализации трещин в районе станции Прогресс (оазис Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида), которые проводились на участке строительства новой посадочной площадки Зенит и были направлены на оценку как трещиноватости ледника, так и динамической ситуации в его пределах (Суханова и др., 2023). На полученных временных георадарных разрезах было выявлено большое количество трещин на различных глубинах от поверхности ледника. При этом установлено, что в пределах взлётно-посадочной полосы они не представляют опасности и не мешают её эксплуатации.

Особое внимание уделяется и тем посадочным площадкам, которые расположены в районах

развития выводных и шельфовых ледников (Суханова и др., 2019). В указанной публикации приводятся результаты георадарных исследований, которые выполнялись для подготовки взлётно-посадочной полосы на морском льду в районе полевой базы Оазис Бангера в Восточной Антарктиде. В ходе полевых исследований были определены три зоны в пределах залива Транскрипция на основе оценки безопасности этого участка.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Полевые изыскания на посадочной площадке станции Новолазаревская выполнялись с 21 декабря 2023 г. по 5 февраля 2024 г. Комплекс работ включал в себя георадарное профилирование, геодезические измерения, термометрию в скважине, а также анализ метеорологических данных, регистрируемых на посадочной площадке с 2014 г. Методом георадиолокации выполнялось обследование состояния верхней части ледника, а также изучение его строения на глубину около 60 м. Определение планово-высотного положения знаков разметки ВПП при использовании DGPS комплекса проводилось для оценки деформаций ледника в районе ВПП, как за летний сезон, так и за период двухлетнего мониторинга. Метеорологические

данные использовались в качестве дополнительной информации при анализе особенностей движения ледника. Схема расположения работ представлена на рис. 1.

Георадарная съёмка в районе посадочной площадки станции Новолазаревская выполнялась в масштабе 1:25 000 по сети рядовых и секущих маршрутов на территории площадью около 5.6 км² при помощи георадара ОКО-3 (ООО «Логические системы», Россия) с экранированными антеннами на частотах зондирования 150 и 900 МГц. Для повышения точности использовался одометр, который обеспечивал равномерность регистрации данных по маршруту через каждые 10 см. Съёмка проводилась пешим порядком (рис. 2, а). Плановая привязка профилей осуществлялась DGPS комплексом EFT M2 GNSS (EFT Group, Россия) (рис. 2, б). Поскольку результаты георадарной съёмки, выполненной вдоль оси взлётно-посадочной полосы с использованием высокочастотной антенны 900 МГц, оказались сильно зашумлёнными из-за обилия нервноностей и мелких нарушений в месте соприкосновения антенны с изучаемой средой (заstrуги, мелкие трещины, шероховатая поверхность льда), для результирующей площадной съёмки было решено использовать георадар с антенной 150 МГц с длиной записи 800 нс

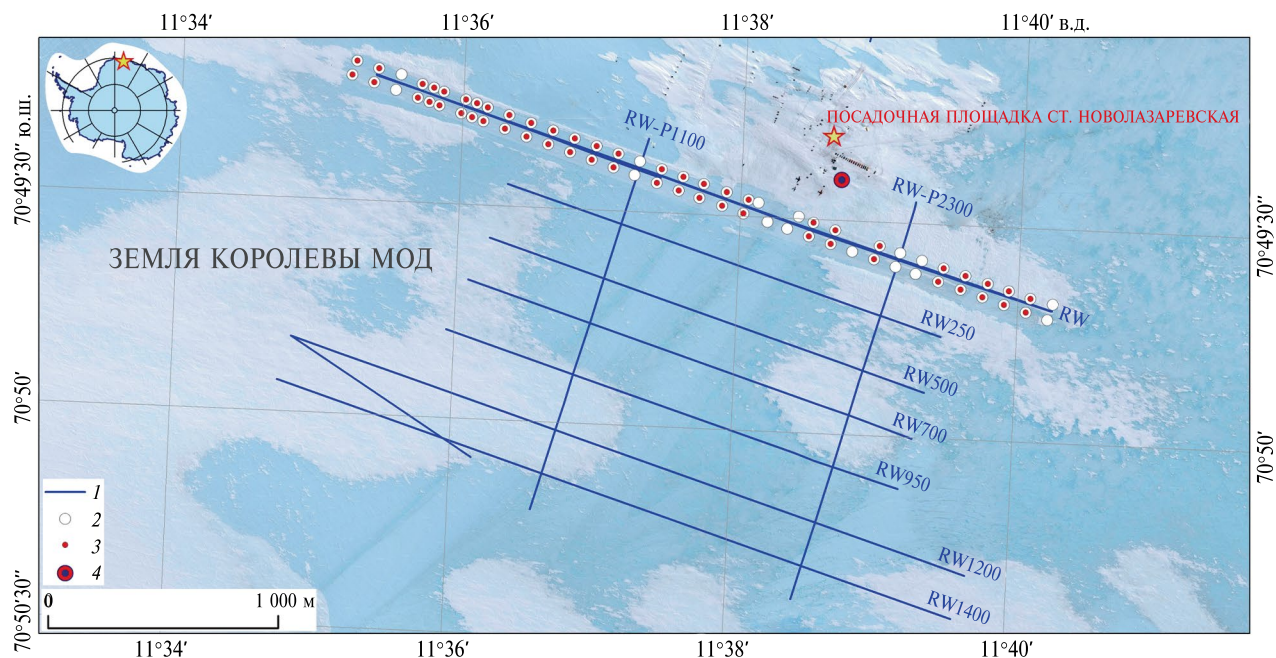


Рис. 1. Схема расположения работ в районе посадочной площадки станции Новолазаревская: 1 – георадарные маршруты; 2 – пункты GNSS съёмок 2023/24 г.; 3 – осевые знаки разметки взлётно-посадочной полосы, используемые для расчёта деформации ледника за двухлетний период; 4 – автоматическая метеорологическая станция Milos 520

Fig. 1. Location map of the study in the Novo Runway area: 1 – GPR routes; 2 – GNSS survey points 2023/24; 3 – runway marking flags used to calculate ice sheet deformation over a 2-year period; 4 – automatic weather stations Milos 520

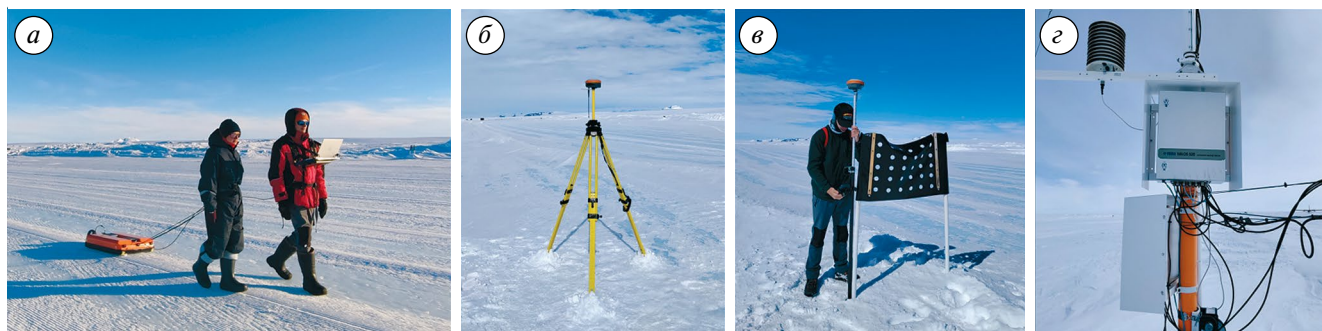


Рис. 2. Выполнение работ в районе посадочной площадки: съёмка георадаром OKO-3 с антенной 150 МГц (а); базовая станция EFT M2 (б); измерения ровером EFT M2 (в); автоматическая метеостанция Milos 520 (г)

Fig. 2. Field work at the Novo Runway area: GPR sounding with OKO-3 at a frequency of 150 MHz (a); EFT M2 base station (б); measurement by EFT M2 rover (в); automatic weather station Milos 520 (г)

и 1024 точек на трассу. Благодаря мощному генератору и одновременно достаточной разрешающей способности, выбранное оборудование обеспечило как высокую детальность для выявления даже мелких нарушений в толще ледника, так и достаточную глубинность для прослеживания крупных элементов, таких как складки, вертикальные контакты и прочее. Общая протяжённость маршрутов в районе посадочной площадки составила 32.5 км. Схема их расположения представлена на рис. 1.

Георадарная съёмка была выполнена по системе семи субпараллельных и двух секущих маршрутов. Съёмка не была продолжена на большее удаление из-за обилия трещин. Дальний к югу от ВПП профиль располагался на расстоянии 1400 м. Георадарные данные обрабатывались по стандартной методике (Владов и др., 1997; Владов, Старовойтой, 2004). Сложность при обработке и последующей интерпретации данных была связана с выбором кинематической модели среды, от которой зависит корректность пересчёта временных разрезов в глубинные. Поскольку посадочная площадка расположена на «голубом льду», для которого характерно либо полное отсутствие, либо незначительная толщина снежного покрова, пересчёт временного георадарного разреза в глубинный осуществляется в рамках модели однородной среды с диэлектрической проницаемостью ϵ , $\epsilon=3.17$, что соответствует скорости распространения электромагнитных волн 168.5 м/мкс (Мачерет, 2006).

Геодезические измерения. Для инструментальных измерений деформаций в теле ледника в пределах взлётно-посадочной полосы по аналогии с работами, выполненными авторами в 2021 г. (Попов и др., 2022) определялись координаты жёстко закреплённых на местности пунктов. В качестве них использовались знаки разметки (флаги) взлётно-посадочной полосы, расположенные по обе стороны от её центра. Измерения проводились DGPS комплексом EFT в режиме «кинематика в реальном

времени (RTK)» с использованием пары приёмников EFT M2 GNSS, один из которых назначался в качестве базовой станции (установка по среднему), а второй — в качестве ровера (см. рис. 2, б–в). Вешка с ровером устанавливались единообразно вплотную к столбу знака разметки, ближайшему со стороны перрона, как это делалось во время съёмки 2021 г. (Попов и др., 2022). В течение летнего полевого сезона 2023/24 г. было выполнено три измерения: в начале сезона, в середине и в конце. Временной интервал между первой и второй съёмками составил 23 дня (24 декабря 2023 г. — 16 января 2024 г.), а между второй и третьей — 19 дней (16 января — 4 февраля 2024 г.). Общее время наблюдений составило 42 дня. Промежуточное измерение служило дополнительной проверкой характера движения ледника. В дальнейшем данные о местоположении большей части знаков разметки использовались и для оценки смещений ледника за период 2 лет и 3 месяцев.

Для оценки погрешности геодезической съёмки DGPS комплексом EFT, во время 3-го определения координат флагов разметки взлётно-посадочной полосы были проведены дополнительные дублирующие измерения части флагов, составившие 45% от общего количества точек этой съёмки. При дублирующих измерениях ровер EFT M2 устанавливался у каждого из флагов разметки на южной стороне ВПП. В результате для каждого флага на южной стороне были получены значения координат x_i , y_i основной съёмки и x_{ki} , y_{ki} повторных измерений. Результирующая погрешность включает в себя аппаратную погрешность, погрешность позиционирования DGPS и точность установки ровера на пикете. Для расчёта среднеквадратичной погрешности σ использовалось расстояние в плане δ между пунктами основной и дублирующей съёмок. Расчёт выполнялся по стандартным формулам:

$$\delta_i = \sqrt{(x_i - x_{ki})^2 + (y_i - y_{ki})^2}, \quad \sigma = \pm \sqrt{\frac{1}{2n-1} \sum_{i=1}^n \delta_i^2},$$

где $x_1, y_1, \dots, x_n, y_n$ – координаты пунктов основной съёмки, $x_{k1}, y_{k1}, \dots, x_{kn}, y_{kn}$ – координаты дублирующихся пунктов, δ – расстояние в плане между пунктами, n – количество повторных измерений. Среднеквадратичное отклонение σ составило 1.6 см. Таким образом, значения съёмки, превышающие величину σ , принимались в качестве истинных смещений приповерхностной толщи ледника.

Неравномерное движение ледника порождает в нём напряжения, а они, в свою очередь, приводят к деформациям, которые могут быть инструментально измерены. Величина скорости деформации ϵ , в соответствии с методикой, изложенной в ряде работ (например, Нуе, 1959; Попов и др., 2022), определяется как относительное изменение расстояния между некоторыми пунктами за единицу времени Δt , т.е.

$$\epsilon = \frac{1}{\Delta t} \frac{l_2 - l_1}{l_1},$$

где l_1 и l_2 – начальный и конечный размеры. Именно такие измерения и были сделаны в осенний период 2021 г. (Попов и др., 2022) и трижды в нынешнем полевом сезоне путём определения координат знаков разметки взлётно-посадочной полосы. Скорости деформаций отдельно рассчитывались для продольного ϵ_{\parallel} и поперечного ϵ_{\perp} по отношению к оси взлётно-посадочной полосы направлений. Затем ϵ_{\parallel} и ϵ_{\perp} были усреднены по соседним сторонам, которые образуют четырёхугольник и приведены к его середине в виде значений $\bar{\epsilon}_{\parallel}$ и $\bar{\epsilon}_{\perp}$.

Для оценки деформации ледника в пределах ВПП с начала мониторинга (31 октября 2021 г.) и до конца нынешнего полевых сезона (4 февраля 2024 г.) использовались данные по положению тех флагов (54 шт.), местоположение которых не изменялось с 2021 г. (см. рис. 1). Итоговый период расчёта составил около 2 лет и 3 месяцев.

Погрешность определения деформаций вдоль ϵ_{\parallel} и поперёк ϵ_{\perp} взлётно-посадочной полосы оценим исходя из того, что

$$\epsilon = \frac{l_2 - l_1}{l_1} = \frac{\Delta l}{l_1},$$

тогда

$$\frac{\delta \epsilon}{\epsilon} \approx \frac{\delta \Delta l}{\Delta l} + \frac{\delta l_1}{l_1},$$

где $\delta \epsilon$ – погрешность определения деформации. Поскольку l_1 и l_2 являются равнозначными измерениями, то $\delta \Delta l = 2 \delta l_1$ и, согласно представленным оценкам, $\delta \Delta l \approx 0.03$ м. Среднее расстояние между знаками разметки, выбранными для расчётов, составляет 120 м. Таким образом $\delta l_1 / l_1 = 2.5 \times 10^{-4}$. Среднее смещение вдоль Δl_{\parallel} и поперёк Δl_{\perp} ВПП

составляют соответственно $\Delta l_{\parallel} = 1.24$ м и $\Delta l_{\perp} = 0.3$ м. Средняя величина относительных погрешностей определения деформаций вдоль и поперёк взлётно-посадочной полосы $\delta \epsilon_{\parallel} / \epsilon_{\parallel}$ и $\delta \epsilon_{\perp} / \epsilon_{\perp}$ составляет 2.4% и 10% соответственно.

Анализ метеорологических данных. Ближайшей к объекту исследования является автоматическая метеорологическая станция (АМС) Milos-520, расположенная на посадочной площадке станции Новолазаревская и предназначенная для обеспечения полётов в весенне-летний период. Она находится на абсолютной высоте 571 м, а подстилающей поверхностью является лёд и снег. Поскольку посадочная площадка функционирует при наиболее благоприятных для авиации условиях (с середины октября до конца февраля), то и АМС работает, как правило, с октября по март. За остальные месяцы данные наблюдений отсутствуют. Примерно в 10 км от неё, на территории оазиса Ширмахера, функционирует постоянно действующая метеоплощадка станции Новолазаревская (№ 89512). Абсолютная высота её положения составляет 119 м, а подстилающем покрытием является грунт. Ввиду того, что летом поверхность оазиса из-за сильного поглощения солнечной радиации тёмной поверхностью скал и незначительного альбедо получает примерно в три раза больше солнечного тепла, чем окружающая снежно-ледовая поверхность, то использовать данные с метеоплощадки станции Новолазаревская напрямую при анализе температуры воздуха в районе посадочной площадки некорректно. Однако, определив коэффициент пересчёта, на который температура воздуха в оазисе и на леднике отличаются друг от друга, появляется возможность восстановить эти сведения для района посадочной площадки за недостающий период.

В результате сопоставления данных температуры воздуха на высоте 2 м от поверхности земли для двух указанных метеостанций с 9 декабря 2014 г. до 21 февраля 2024 г. было получено, что в среднем температура воздуха на посадочной площадке на 4.5 °С ниже, чем в оазисе. Введя этот поправочный коэффициент в данные с метеоплощадки станции Новолазаревская, был получен непрерывный 10-ти летний температурный ряд для района посадочной площадки (1 января 2014 г. – 21 февраля 2024 г.). В таблице представлены результаты среднегодовой и средней летней температуры на посадочной площадке станции Новолазаревская.

СТРОЕНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ЧАСТИ ЛЕДНИКА

Состояние приповерхностной части ледника является определяющим фактором принятия решения о функционировании посадочной площадки в штатном режиме. При этом основная задача заключается в выявлении трещин, которые могут

стать причиной возникновения аварийной ситуации. Визуальные наблюдения, выполненные на взлётно-посадочной полосе, перроне, а также на прилегающих боковых полосах и концевых зонах безопасности, показали, что видимые открытые трещины отсутствуют. Встречающиеся трещины были залечены замёрзшей в них талой водой. Их ширина не превышала 0.5 м.

Георадиолокационные исследования позволили оценить характеристики трещин на самой взлётно-посадочной полосе и выявить их положение на участке к югу от её центра, где они не были видны из-за снега. На рис. 3 представлен накидной монтаж временных георадарных разрезов, полученных по рядовым маршрутам съёмки. Самый северный (верхний) из них получен по профилю вдоль оси взлётно-посадочной полосы, а остальные располагаются к югу от неё на расстояниях 250, 500, 700, 950, 1200 и 1400 м (см. рис. 1). Такое отклонение к

югу было выполнено для изучения характера сочленения ледяных потоков, выявленных в ходе рекогносцировочных работ 2021 г. (Попов и др., 2022), поскольку именно эти зоны наиболее динамичны.

Западная часть посадочной площадки представлена преимущественно пологими складками. Слои в леднике субгоризонтальны, характеризуются малыми углами падения, отсутствием приповерхностных крупных трещин, что делает такие участки максимально пригодными для нахождения взлётно-посадочной полосы. При этом в самой западной части, ближе к её началу, можно наблюдать обилие тонких (до 30 см) трещин, особенно чётко прослеживающихся на южных профилях (RW1200, RW1400). Трещины залечены, что подтверждается осмотром и бурением. Однако эта зона требует визуального мониторинга, так как в годы, следующие за холодными годами с отсутствием таяния (например, лето 2021/22 г.), трещины могут оставаться

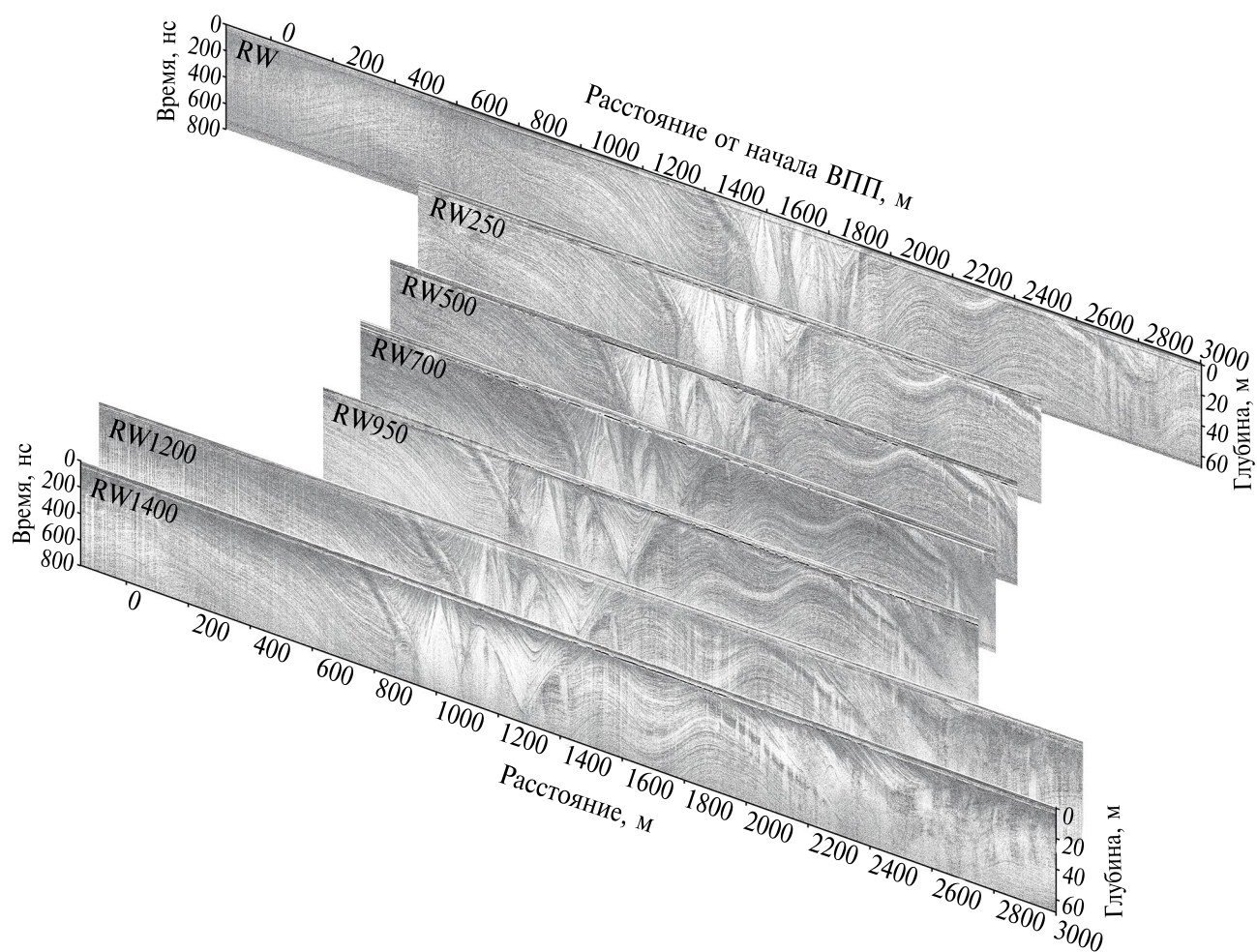


Рис. 3. Радарограммы, полученные в районе посадочной площадки ст. Новолазаревская (Названия профилей соответствуют рис. 1)

Fig. 3. GPR profiles obtained in the Novo Runway area (The profile names correspond to Fig. 1)

открытыми, что наблюдалось в октябре—декабре 2022 г. (по информации аэродромной группы посадочной площадки). Поскольку именно эта часть взлётно-посадочной полосы преимущественно используется для посадки тяжёлого самолёта на колёсном шасси ИЛ76-ТД, необходим регулярный визуальный контроль за состоянием трещин.

Центральная часть посадочной площадки характеризуется субвертикальными контактами и представляется наиболее неоднозначной в интерпретации. Происхождение этих контактов, вероятно, связано с сочленением двух ледяных потоков, огибающих нунатаки. Центральная часть также осложнена наложенными, несогласно залегающими синклинальными складками в верхней части. Такие структуры могут образовываться в локальных троговых понижениях и представлять собой области развития более молодого льда на более древнем ледяном куполе. Указанная центральная зона сужается ближе к оси взлётно-посадочной полосы, что согласуется с представлениями о движении ледника в северном направлении. На таких участках можно ожидать неравномерное движение ледниковой толщи, что может быть связано с различием в реологических свойствах более древнего и наложенного молодого льда. На их границе также могут наблюдаться значительные градиенты скорости движения льда как в плане, так и по вертикали. Кроме того, поскольку указанная зона относительно молода и развивается наиболее динамично, в её пределах возможно изменение скорости движения ледника в зависимости от величин температуры окружающего воздуха предшествующих сезонов.

Восточная часть посадочной площадки и прилегающая с южной стороны область смята в более крутые складки, чем западная. Углы наклона слоёв больше. На ограниченном участке можно наблюдать чередование антиклинальных и синклинальных складок. Развитие подобных структур в теле ледника можно объяснить подлёдным рельефом и деформациями в результате воздействия встречных потоков. Антиклинальные куполообразные складки, характеризующиеся локальными областями растяжения, сопровождаются достаточно большим количеством трещин. В синклинальных вогнутых складках, вероятно, соответствующих зонам сжатия, трещины не развиваются. Особенно чётко такая тенденция прослеживается на серии южных профилей (напр. RW1400). В северной части района работ (ближе к взлётно-посадочной полосе и на ней самой) трещин в непосредственной близости от поверхности нет (рис. 4). Вероятно, по мере движения ледника они залечиваются. Кроме того, в восточной части изучаемого участка прослеживается складка наложенного льда, подобная несогласно залегающей синклинальной складке в центральной части взлётно-посадочной

полосы. На профиле RW1400 она начинается со второго километра от начала ВПП и простирается до конца профиля (см. рис. 3). А на самой взлётно-посадочной полосе (профиль RW) её можно проследить на участке с 2.5 до 3 км от начала (см. рис. 3). Наложённый лёд перекрывает трещины, сформировавшиеся на сводах складок более древнего льда, что является благоприятным фактором, указывающим на безопасность этих участков. Однако их мониторинг также необходим, так как со временем можно ожидать развитие трещин и в приповерхностных областях.

ДЕФОРМАЦИИ ЛЕДНИКА В ПРЕДЕЛАХ ВЗЛЁТНО-ПОСАДОЧНОЙ ПОЛОСЫ

Посадочная площадка станции Новолазаревская ввиду положения на леднике находится в динамичном состоянии. Естественное неравномерное движение ледника изменяет конфигурацию оси взлётно-посадочной полосы, смещает её разметку и приводит к деформациям в ледниковой толще.

Прежде чем перейти к анализу новых данных смещения знаков разметки взлётно-посадочной полосы, охарактеризуем результаты аналогичной съёмки, выполненной два года назад: 31 октября и 14 декабря 2021 г. (44 суток). Тогда было выяснено, что деформации в продольном направлении (по отношению к оси ВПП) изменялись в пределах от -0.0009 (-0.008 год $^{-1}$) до $+0.0023$ ($+0.020$ год $^{-1}$). В скобках здесь и далее приведены соответствующие скорости деформаций. Положительные значения соответствуют зонам растяжения, отрицательные — зонам сжатия. Самые большие абсолютные значения наблюдались на участках от 400 до 800 м и от 1200 до 1900 м от начальной части взлётно-посадочной полосы. При этом зоны, на которых происходило сжатие, естественным образом сменялись зонами, где происходило растяжение. Деформации в поперечном направлении изменялись в более широких пределах: от -0.0211 (-0.183 год $^{-1}$) до $+0.0018$ ($+0.016$ год $^{-1}$). Это объясняется направлением генерального движения ледника субортогонально оси ВПП. Зона максимальных по модулю скоростей деформаций в поперечном направлении располагалась на участке 1800—2200 м (Попов и др., 2022).

Во время полевого сезона 69-й РАЭ наблюдения выполнялись в летний период, их длительность составила 42 суток: с 24 декабря 2023 г. по 4 февраля 2024 г. Согласно полученным результатам, существенные деформации отмечались в начале взлётно-посадочной полосы от 100 до 200 м, на отрезке от 400 до 800 м, а также в краевых частях центральной области 1500—1700 м и 1900—2100 м. На первых двухстах метрах ВПП преимущественно наблюдались продольные и поперечные по отношению к её

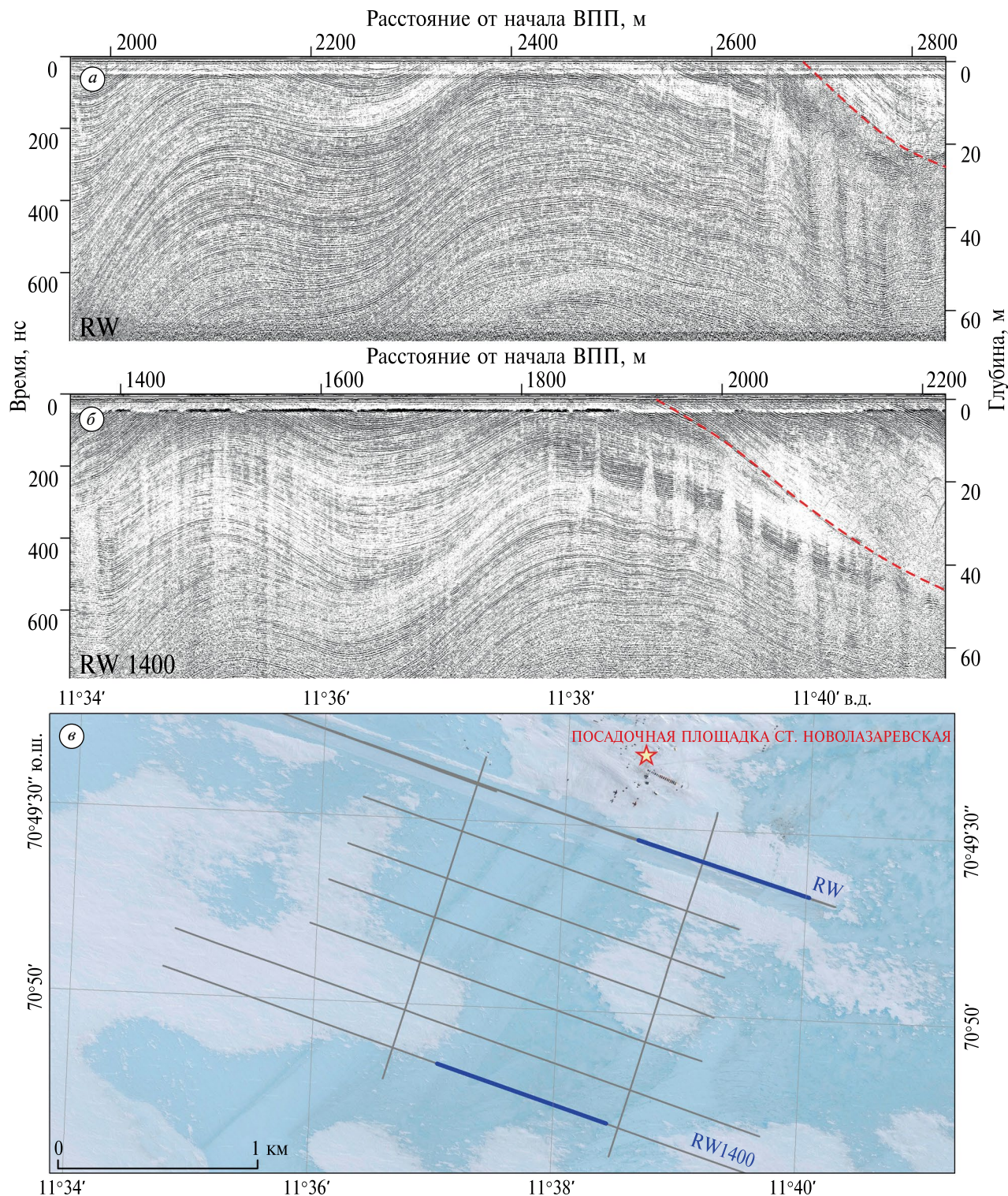


Рис. 4. Зона трещин на крыльях и в ядре антиклинальной складки: преимущественно залеченные и схлопнувшиеся трещины на взлётно-посадочной полосе (а); крупные приповерхностные трещины, расположенные на расстоянии 1.4 км к югу от взлётно-посадочной полосы (б); схема расположения фрагментов георадарных профилей на сечениях а и в (в). На сечениях а и б красной штриховой линией показана нижняя граница наложенного льда

Fig. 4. Zone of crevasses on the limbs and in the core of anticline: mostly healed with ice crevasses on the runway (a); large near-surface crevasses located 1.4 km south of the runway (b); chart of the location of fragments of GPR profiles in sections a and v (v). In sections a and b, the red dashed line shows the lower boundary of the superimposed ice

оси деформации растяжения. В среднем их относительные величины составили 1×10^{-4} и 3×10^{-4} соответственно. На участке от 400 до 800 м отмечалась смена преобладания поперечных деформаций растяжения (при наибольшей величине 7×10^{-4}) на продольные деформации растяжения и сжатия (диапазон изменения составляет от -1×10^{-3} до 1×10^{-3}). Указанный участок характеризуется наличием узких трещин, а по георадарным данным соответствует локальному прогибу в замке антиклинальной складки. Области от 1500 до 1700 м и от 1900 до 2100 м характеризовались однозначными поперечными деформациями растяжения, достигающими 0.001. Вдоль оси взлётно-посадочной полосы отмечены как деформации растяжения, так и сжатия, изменяющиеся от -0.002 до 0.001 . Указанные фрагменты примыкают к вертикальным контактам центральной части и характеризуются наиболее неоднородным строением ледовой толщи. Таким образом, по данным полевого сезона 69-й РАЭ (2023/24 г.) получено, что деформации вдоль всей взлётно-посадочной полосы изменялись в пределах от -0.0019 (-0.016 год^{-1}) до $+0.0014$ ($+0.012 \text{ год}^{-1}$), а поперёк её оси от -0.001 (-0.004 год^{-1}) до $+0.001$ ($+0.009 \text{ год}^{-1}$). При этом главное различие с предыдущими измерениями заключалось в том, что в центральной части, соответствующей слиянию ледяных потоков, отмечались как значительно меньшие величины деформаций поперёк оси ВПП, так и их положительные значения. Это означает, что указанный участок на момент измерений представлял собой зону растяжения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение величин продольных деформаций, полученных в весенне-летний период 2021 г. и в летний период 2023/24 г., свидетельствует о том, что они примерно сопоставимы и изменяются в одном диапазоне (исключение составляют измерения 2021 г., полученные для района сочленения потоков). При этом деформации в поперечном направлении различаются на порядок. Это указывает на неравномерность движения ледника, особенно в области сочленения потоков.

Для анализа полученных результатов обратимся к данным по температуре воздуха на посадочной площадке станции Новолазаревская. В таблице представлены среднегодовые и средние летние (декабрь–январь) температуры воздуха. Из них, в частности, следует, что летние сезоны, предшествующие первой серии измерений в конце 2021 г., были достаточно тёплыми, а температура летом 2020 г. показала десятилетний максимум: $-3.83 \text{ }^\circ\text{C}$. Таким образом, накопившееся в леднике тепло вполне могло привести к увеличению скорости движения его верхней части. Последующие летние сезоны и годы в целом, как следует из

представленной таблицы, были в целом более холодными, и скорость течения приповерхностной части ледника уменьшилась. Моделирование в авторской программе FrozenSoil (Попов и др., 2024) для незаснеженного ледника показало, что глубина затухания сезонных колебаний в нём составляет около 32 м, а температура в верхних 20 м изменяется наиболее значительно. При этом температурные вариации до этой глубины доходят примерно через год. Таким образом, значительное смещение верхней части ледника в 2021 г. вполне могло произойти из-за накопления тепла в леднике с временной задержкой, вызванной его теплофизическими свойствами.

Общие деформации за весь период мониторинговых наблюдений, охватывающий почти два с половиной года (826 суток), являются усреднёнными, но показательными величинами, поскольку в таком случае учитывается характер движения ледника не только в тёплое летнее время, но и в холодный зимний сезон. В направлении вдоль оси взлётно-посадочной полосы значения деформаций изменяются от -0.0531 (-0.023 год^{-1}) до $+0.0517$ ($+0.023 \text{ год}^{-1}$), а поперёк неё – в диапазоне от -0.0122 (-0.005 год^{-1}) до $+0.0207$ ($+0.009 \text{ год}^{-1}$). В скобках также приведены соответствующие скорости деформаций.

В продольном относительно оси ВПП направлении зоны сжатия закономерно чередовались с зонами растяжения (рис. 5). Два самых больших значения продольных скоростей деформаций в абсолютном выражении (-0.023 год^{-1} и $+0.023 \text{ год}^{-1}$) соответствуют соседним полигонам (P16 и P17), находящимся на расстоянии 1300–1500 м от начала

Таблица. Температура воздуха по метеоданным с посадочной площадки станции Новолазаревская

Год	Температура, $^\circ\text{C}$	
	среднегодовая	средняя за летний период (1.12 текущего – 31.01 следующего года)
2014	-15.04	-5.29
2015	-15.08	-5.65
2016	-13.76	-4.06
2017	-14.62	-5.46
2018	-14.57	-4.61
2019	-14.67	-3.83
2020	-14.24	-5.45
2021	-15.1	-6.21
2022	-14.5	-5.79
2023	-13.7	-6.16

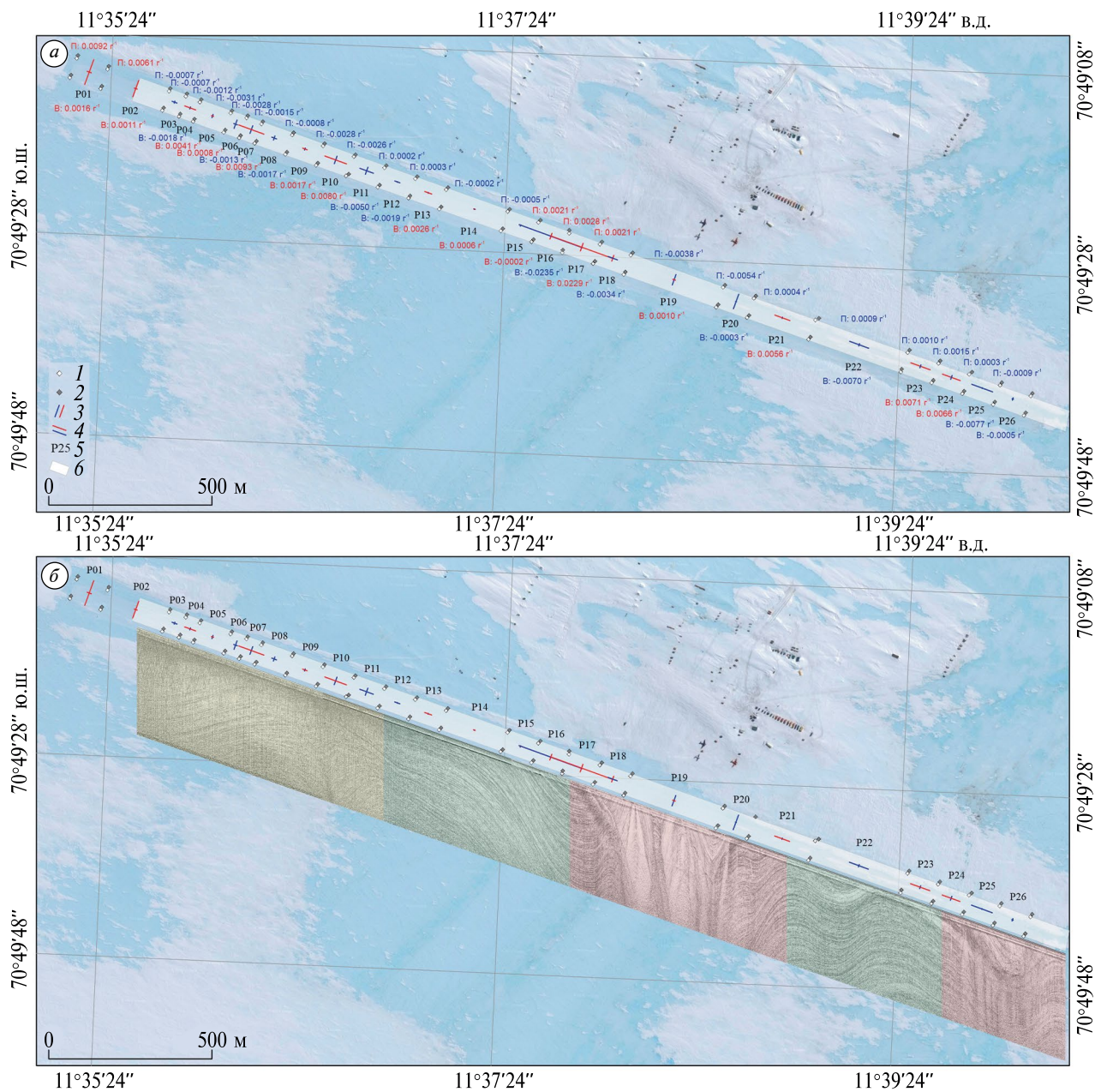


Рис. 5. Схема скоростей деформаций ледника в пределах взлётно-посадочной полосы за период мониторинга (31.10.2021 – 4.02.2024). Величины скоростей деформаций ледника вдоль (префикс В:) и поперёк (префикс П:) оси взлётно-посадочной полосы, выраженные в год⁻¹. Красные линии соответствуют областям растяжения, а синие – областям сжатия. Длина линейного знака пропорциональна модулю скорости деформации (а). Схема скоростей деформаций, совмещённая с георадарным разрезом по профилю «RW» (его положение показано на рис. 1) (б). На секции (а): 1 – положение флагов разметки 31.10.2021; 2 – положение флагов разметки 4.02.2024; 3 – скорость деформации поперёк оси взлётно-посадочной полосы; 4 – скорость деформации вдоль оси взлётно-посадочной полосы; 5 – названия полигонов; 6 – взлётно-посадочная полоса

Fig. 5. Deformation rates scheme of the glacier in the area of runway during the monitoring period (October 31, 2021 – February 4, 2024). Values of deformation rates of the glacier (year⁻¹) along (prefix B:) and across (prefix P:) the Novo Runway. Positive values (stretching) are red lines, negative values (compression) are blue lines. The length of the line is proportional to the value of the modulus of deformation rates (a). Deformation rates scheme combined with the GPR section along the «RW» profile (its position is shown in Fig. 1) (b). In section (a): 1 – position of marking flags on 10/31/2021; 2 – position of marking flags 02/04/2024; 3 – deformation rates across the runway axis; 4 – deformation rates along the runway axis; 5 – names of polygons; 6 – runway

ВЫВОДЫ

взлётно-посадочной полосы в краевой части (левая граница) центральной области слияния ледовых потоков. Вероятно, они создают большее давление на левую (западную) часть ледника, нежели на противоположную, что может быть обусловлено топографией подлёдной поверхности. Создаваемое избыточное давление ожидаемо образует сначала зону растяжения, а затем зону сжатия. Именно в такой последовательности и изменяются знаки скоростей деформации.

В поперечном относительно оси ВПП направлении на участке её торцевой зоны наблюдалась локальная область растяжения. С начала взлётно-посадочной полосы и до 1300 м имело место сжатие, сменившееся областью растяжения до 1600 м с последующей сменой на область сжатия до 3000 м (рис. 5). Наибольшая величина скорости сжатия отмечена в районе 1900 м от начала ВПП и составила -0.005 год^{-1} . Максимальная величина скорости растяжения достигала 0.009 год^{-1} .

Комплексные исследования на посадочной площадке станции Новолазаревская позволили выявить особенности строения ледника, и инструментально, с высокой точностью, измерить его деформации и получить первые результаты двухлетнего мониторинга этого района. Основываясь на результатах георадарной съёмки, исследуемый район можно подразделить на три зоны, сходные по структурам в толще ледника.

Зона 1. Ненарушенные субгоризонтальные слоистые тощи (рис. 6, а–б). Это наиболее благоприятные зоны, которые наблюдаются на участках от 800 до 1400 м и от 2100 до 2600 м от начала взлётно-посадочной полосы. Здесь ледник имеет чётко выраженную слоистую ненарушенную структуру. Трещины и любые другие неоднородности отсутствуют.

Зона 2. Смятые в складки тощи с трещинами разного размера и глубины заложения (см. рис. 6, а, в).

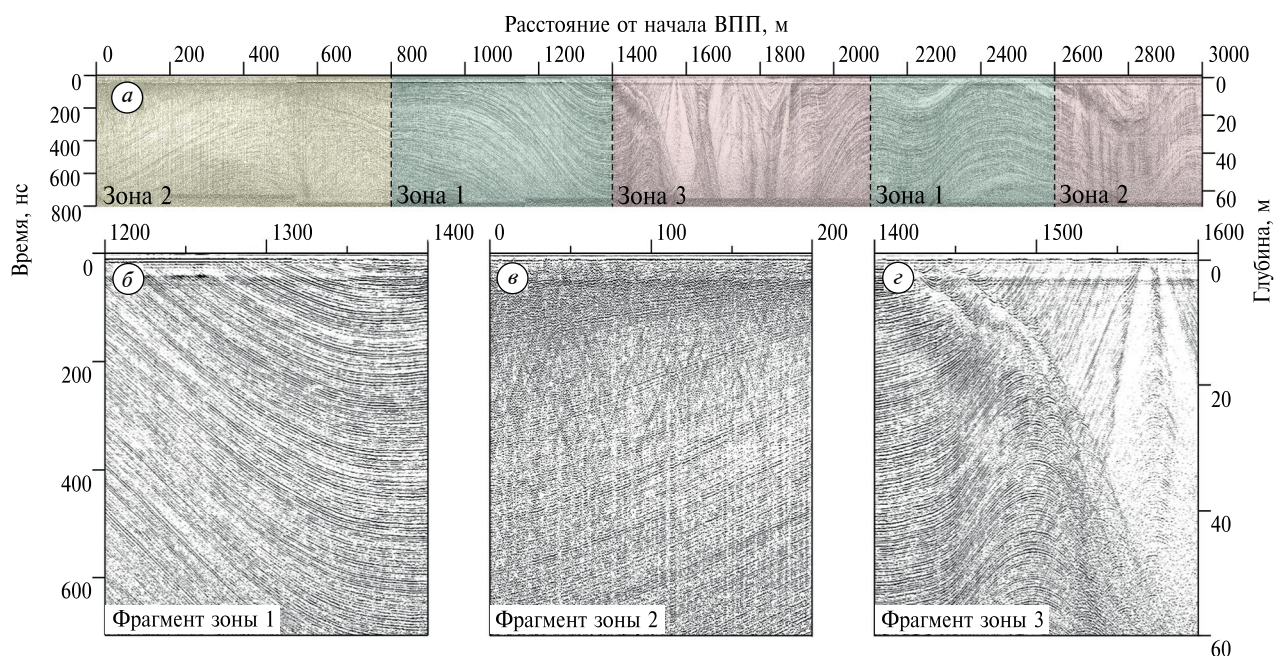


Рис. 6. Классификация взлётно-посадочной полосы по структурам (зоны) в толще ледника и степени необходимости их мониторинга (цвета): георадарный разрез «RW», полученный по центральной оси взлётно-посадочной полосы (а); фрагмент георадарного профиля, демонстрирующий ненарушенное залегание ледниковых слоёв (зона 1) (б); обильные дифрагированные волны от мелких залеченных трещин в начале взлётно-посадочной полосы на крыле антиклинальной складки (зона 2) (в); фрагмент георадарного профиля, демонстрирующий субвертикальный контакт в области сочленения ледовых потоков (зона 3) (г). Зелёный цвет – наиболее стабильные участки; жёлтый цвет – участки, требующие визуального мониторинга за состоянием трещин; красный цвет – относительно нестабильные участки в долгосрочной перспективе, требующие регулярного обследования

Fig. 6. Classification of the runway by structures (zones) in the ice sheet and the degree of need for their monitoring (colors): GPR section “RW” obtained along the central axis of the Novo Runway (а); a fragment of the GPR profile demonstrating the undisturbed occurrence of ice layers (zone 1) (б); abundant diffracted waves from small healed crevasses at the beginning of the runway on the limb of the anticlinal fold (zone 2) (в); fragment of a GPR profile demonstrating subvertical contact in the area of ice flow junction (zone 3) (г). Green – safe areas; yellow – areas of medium danger that requires monitoring of crevasses; red – the most unsafe areas in the long term. Green – stable areas; yellow – areas requiring visual monitoring of crevasses; red – relatively unstable areas in the long term, requiring regular monitoring

Наблюдается преимущественно в начале и конце взлётно-посадочной полосы. Начало полосы, примерно первые 800 м, характеризуется наличием некрупных, до 20 см в поперечнике, залеченных трещин. Они отчётливо фиксируются на радарограммах в виде обилия дифрагированных волн, а также прослеживаются визуально на открытых участках льда. Подобное поле трещин наблюдается и в южной части района работ, где они шире и подходят к поверхности. Будучи залеченными на ВПП и в ближайших окрестностях, что подтверждено бурением и визуальными наблюдениями, такие трещины не представляют опасности. Однако, как было отмечено в предыдущем разделе, в года с низкими среднегодовыми температурами, а в особенности холодными летними сезонами, трещины могут не заполняться водой и, следовательно, не залечиваться. В этой связи указанная область требует мониторинга и регулярных визуальных наблюдений.

Следует обратить внимание и на последние 400 м взлётно-посадочной полосы. Вся восточная часть района работ изобилует трещинами, особенно заметными на самых южных профилях. На самой ВПП трещины перекрыты складкой более молодого льда. Хотя у поверхности открытых трещин не наблюдалось, полагаем, что необходимо отнести данный участок к зоне возможного развития нарушений в леднике.

Зона 3. Субвертикальные несогласные контакты (см. рис. 6, а, г). Эта зона распространяется в центральной части всей посадочной площадки и наиболее сложна по строению. В её краевых частях наблюдаются относительно высокие деформации и крупные вертикальные структуры, выявляемые на георадарных разрезах. Данная структура прослеживается как вдоль самой взлётно-посадочной полосы, так и на параллельных ей маршрутах. Трещин в приповерхностной части в этой области ВПП в настоящий момент не зафиксировано. Тем не менее именно эта часть посадочной площадки наиболее важна с позиции безопасности, так как в её пределах находится перрон и происходит разворот тяжёлых самолётов при посадке. Эта область представляет интерес также с точки зрения динамики ледника, что указывает на необходимость более пристального мониторинга её состояния в будущем.

На основе полученных данных мониторинга выяснено, что движение ледника в районе взлётно-посадочной полосы крайне неравномерно. На это указывают существенные деформации ледника, наблюдавшиеся в октябре–декабре 2021 г. и незначительные величины абсолютных деформаций летнего сезона 2023/24 г. Расчёты за весь период наблюдений (два года и три месяца) показали, что скорости деформаций ледника в абсолютном выражении достигают в продольном направлении ВПП 0.023 год^{-1} , а в поперечном 0.009 год^{-1} .

Совместный анализ георадиолокации и геодезии позволил также разделить всю взлётно-посадочную полосу на три области, где цветом отображена степень необходимости ежегодного мониторинга (см. рис. 6, а). *Зелёным цветом* показана наиболее стабильная область. Она характеризуется согласно залегающими субгоризонтальными слоями в тоще ледника и его минимальными скоростями деформаций. *Жёлтым цветом* показана область, требующая тщательного визуального мониторинга. Это объясняется тем, что в её пределах отмечаются незначительные продольные деформации растяжения и сжатия, а также некрупные (до 20 см), выходящие к поверхности, но преимущественно залеченные трещины. *Красным цветом* показана область, требующая наиболее тщательного визуального и инструментального мониторинга в процессе эксплуатации полосы. Она характеризуется наличием как структур с несогласными субвертикальными контактами в зоне сочленения ледовых потоков, так и относительно крупных, но не приповерхностных трещин на сводах антиклинальных складок. Указанная область демонстрирует максимально неравномерную скорость движения ледника как в пространстве, так и во времени. Эта область представляется наиболее нестабильной в долгосрочной перспективе.

Таким образом, начатые в 2021 г. работы по изучению состояния посадочной площадки станции Новолазаревская показали отсутствие препятствий к эксплуатации взлётно-посадочной полосы, но мониторинговые наблюдения рекомендуется продолжать.

Благодарности. Авторы выражают благодарность начальнику станции Новолазаревская 68-й РАЭ П.В. Тетереву и сотруднику аэродромной группы М.Г. Бачалдину за помощь в проведении полевых исследований и техническую поддержку, а также сотрудникам Ultima Antarctic Logistic С.Г. Аксютенко, А.А. Рухлову и В.В. Шестерикову за логистическое обеспечение на посадочной площадке и предоставление метеорологических данных и фото- и видеоматериалов. Исследование выполнено при поддержке и содействии Российской антарктической экспедиции.

Acknowledgments. The authors are grateful to the head of the Novolazarevskaya Station 68 RAE P.V. Teterev and the employee of the airfield team, M.G. Bachaldin for their assistance in conducting field research and providing technical support. The authors would like to thank Ultima Antarctic Logistics' employees, S.G. Aksyutenko, A.A. Rukhlov, and V.V. Shesterikov for logistics support on the Novo Runway and provision of meteorological data, as well as photo and video materials. The study was supported by the Russian Antarctic Expedition.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александров В.Я., Капустин А.В., Троицкий И.В., Харсов А.А.* Некоторые особенности метеорологического обеспечения авиации в Антарктиде // Сб. трудов Всероссийской науч.-практич. конф. «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития». СПб: Российский гос. гидромет. ун-т, 2023. С. 311–315.
- 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.
- Ключников Г.Я.* Создание высокопрочных снежных аэродромов в Арктике и Антарктике // Транспорт Российской Федерации. 2006. № 3. С. 34–36.
- Лукин В.В.* Современные проблемы и перспективы деятельности России в Антарктике // Тр. ВНИРО. 2015. Вып. 156. С. 178–196.
- 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.
- Поляков С.П., Иванов Б.В., Клепиков А.В., Клоков В.Д., Лукин В.В., Мартьянов В.Л.* Физико-механические свойства снежно-фирнового покрытия взлётно-посадочной полосы на станции Восток в Антарктиде // Лёд и Снег. 2010. Т. 109. № 1. С. 119–122.
- Поляков С.П., Иванов Б.В., Клепиков А.В., Клоков В.Д., Лукин В.В., Мартьянов В.Л.* К вопросу о строительстве снежного аэродрома для тяжелых колесных самолетов в центральной Антарктиде, на станции Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. Т. 81. № 1. С. 101–107.
- 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., Лебедева Л.С.* «Программа для моделирования процессов теплопереноса в многолетнемёрзлых породах» (FrozenSoil) // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS № 2023669994. Заявка № 2023669430 от 25.09.2023. Оpubл. 25.09.2023. Бюл. № 10.
- Попов С.В., Кашкевич М.П., Боронина А.С.* Состояние взлётно-посадочной полосы станции Новолазаревская (Восточная Антарктида) и оценка безопасности её эксплуатации по данным исследований 2021 г. // Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 4. С. 621–636. <https://doi.org/10.31857/S2076673422040156>
- Попов С.В., Межионов С.В., Поляков С.П., Мартьянов 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.
- Суханова А.А., Банцев Д.В., Шиманчук Е.В., Попов С.В.* Гляциологические изыскания в районе антарктической станции Прогресс в сезон 68-й РАЭ // Российские полярные исследования. 2023. № 2. С. 20–22.
- Суханова А.А., Попов С.В., Поляков С.П., Кашкевич М.П., Мартьянов В.Л.* Георадарные исследования для подготовки взлётно-посадочной полосы на морском льду в районе полевой базы Оазис Бангера, Восточная Антарктида // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 3. С. 315–327.
- Суханова А.А., Харитонов В.В., Попов С.В., Кашкевич М.П.* Применение метода георадиолокации для обеспечения безопасности логистических операций в районе станции Русская в Западной Антарктиде // Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 3. С. 427–440.
- Arcone S.A., Delaney A.J., Tobiasson W.* Subsurface radar investigations at the Pegasus glacial-ice runway and Williams field, McMurdo Station, Antarctica. CRREL Report 94–12. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1994. 24 p.
- Arcone S.A.* High resolution of glacial ice stratigraphy: a ground-penetrating radar study of Pegasus Runway, McMurdo Station, Antarctica // Geophysics. 1996. V. 61. № 6. P. 1653–1663.
- 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., Deshovykh 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 Science. 2019. V. 22. P. 100478. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.08.004>
- Mellor M.* Hard-surface runways in Antarctica. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1988. 87 p.
- 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.
- Paige R.A.* Sub-surface melt pools in the McMurdo Ice Shelf, Antarctica // Journ. of Glaciology. 1968. V. 7. № 51. P. 511–516.
- Rivera A., Casassa G., Thomas R., Rignot E., Zamora R., Antúnez D., Ordenes F.* Glacier wastage on southern Adelaide Island, Antarctica, and its impact on snow runway operations // Annals of Glaciology. 2005. V. 41. P. 57–62.
- Urbini S., Bianchi-Fasani G., Mazzanti P., Rocca A., Vituari L., Zanutta A., Frezzotti M.* Multi-temporal investigation of the Boulder Clay Glacier and Northern Foothills (Victoria Land, Antarctica) by integrated surveying techniques // Remote Sensing. 2019. V. 11. № 12. P. 1501. <https://doi.org/10.3390/rs1112150>
- White G., McCallum A.* Review of ice and snow runway pavements // International Journ. of Pavement Research and Technology. 2018. V. 11. № 3. P. 311–320.

Citation: Boronina A.S., Kashkevich M.P., Popov S.V., Mikhailov E.M., Druzhin A.E. New data on the structure and motion of the ice sheet in the area of the Novolazarevskaya Research Station (East Antarctica). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (3): 387–402. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673424030065

New data on the structure and motion of the ice sheet in the area of a runway of the Novolazarevskaya Reserch Station (East Antarctica)

A. S. Boronina^{а*}, M. P. Kashkevich^б, S. V. Popov^{в,б}, E. M. Mikhailov^б, A. E. Druzhin^б

^аState Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

^бSaint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

^вPolar Marine Geosurvey Expedition, St. Petersburg, Russia

*e-mail: al.b.s@yandex.ru

Received May 11, 2024 / Revised June 14, 2024 / Accepted July 8, 2024

Currently, the Russian Federation has the only “blue ice” runway in Antarctica. It is located on the Queen Maud Land and is a part part of the landing site of the Russian Novolazarevskaya Station. This is one of the largest aviation transport hubs in the Indo-Atlantic sector of the continent, capable of landing heavy aircraft with wheeled chassis. Despite all the advantages that “blue ice” runways have, due to their location on the glacier, they are subject to dangerous glaciological processes caused by the ice sheet motions. The purpose of this research is to study the structure of the ice sheet along the runway and in the vicinity of the airbase Novo Runway (Novolazarevskaya Station), as well as to continue monitoring the uneven flow of the glacier, which began in 2021. The article presents the results of field studies carried out from December 2023 to February 2024, which included georadar profiling at a frequency of 150 MHz and three definitions of the coordinates of the runway markings to estimate their displacement for the summer season of 2023/24. There are also presented: a comparison of the values of the ice sheet deformation within the runway limits measured in the autumn of 2021 and the Antarctic summer of 2023/24, the calculation of deformations for the two-year period of monitoring, and the analysis of air temperature data for 2014–2024 from the weather station of the Novo Runway. It was found that at the beginning of the runway (up to 800 m) small healed crevasses are observed. This area requires regular visual monitoring. The central part of the runway appears to be the most complex in structure, demonstrating relatively high deformations in the marginal parts and characterized by large vertical structures in the glacier. In the long term, this area, as well as about 400 m at the end of the runway, are the most unstable. A joint analysis of data on the displacement of runway markings for 2021 and 2023/24 showed that values of the deformations may differ by an order of magnitude from year to year. Based on the results obtained, three areas were identified within limits of the runway, which differ in the degree of need for regular examination of their condition.

Keywords: hazardous glaciological processes, ice crevasses, glacial motion, GPR profiling, Novo Runway, East Antarctica

REFERENCES

- Alexandrov V.Ya., Kapustin A.V., Troitsky I.V., Kharsov A.A. Some features of meteorological support of aviation in Antarctica. *Sbornik trudov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Gidrometeorologiya i fizika atmosfery»: sovremennyye dostizheniya i tendencii razvitiya*. Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Hydrometeorology and Atmospheric Physics: Modern Achievements and Development Trends». 2023: 311–315. [In Russian].
- Vladov M.L., Zolotarev V.P., Starovoytov A.V. *Metodicheskoe rukovodstvo po provedeniyu georadiolokatsionnyh 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].
- Klyuchnikov G.Ya. Construction of high-strength snow airfields in the Arctic and Antarctic. *Transport Rossijskoj Federacii*. Transport of the Russian Federation. 2006, 3: 34–36. [In Russian].
- 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].
- 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].
- Poliakov S.P., Ivanov B.V., Klepikov A.V., Klokov V.D., Lukin V.V., Mart'yanov V.L.* Physical and mechanical properties of snow-firn cover of the Vostok Station air strip, Antarctica. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2010, 109 (1): 119–122. [In Russian].
- Poliakov S.P., Ivanov B.V., Klepikov A.V., Klokov V.D., Lukin V.V., Mart'yanov V.L.* On the building of snow runway for the heavy wheeled aircrafts at Vostok Station, central Antarctica. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2009, 81 (1): 101–107. [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., Lebedeva L.S.* «Program for modeling heat and mass transfer processes in permafrost» (FrozenSoil) // Certificate of the registration RUS No. 2023669994. Application No. 2023669430, 09.25.2023. Publ. 09.25.2023. Bull. No. 10. [In Russian].
- 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].
- Popov S.V., Mezhonov S.V., Polyakov S.P., Mart'yanov 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].
- Sukhanova A.A., Bantsev D. V., Shimanchuk E.V., Popov S.V.* Glaciological research in the area of the Antarctic Progress Station during the season of the 68th RAE. *Rossiyskie polyarnye issledovaniya*. Russian Polar Research. 2023, 2: 20–22. [In Russian].
- Sukhanova A.A., Popov S.V., Polyakov S.P., Kashkevich M.P., Mart'yanov V.L.* GPR research for the organization of the runway on the sea ice in the area of the Bunger Oasis field base, East Antarctica. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65 (3): 315–327. [In Russian].
- 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].
- Arcone S.A., Delaney A.J., Tobiasson W.* Subsurface radar investigations at the Pegasus glacial-ice runway and Williams field, McMurdo Station, Antarctica. CRREL Report 94–12. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. 1994: 24 p.
- Arcone S.A.* High resolution of glacial ice stratigraphy: a ground-penetrating radar study of Pegasus Runway, McMurdo Station, Antarctica. *Geophysics*. 1996, 61 (6): 1653–1663.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.08.004>.
- Mellor M.* Hard-surface runways in Antarctica. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1988: 87 p.
- 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.
- Paige R.A.* Sub-surface melt pools in the McMurdo Ice Shelf, Antarctica. *Journ. of Glaciology*. 1968, 7 (51): 511–516.
- Rivera A., Casassa G., Thomas R., Rignot E., Zamora R., Antúnez D., Ordenes F.* Glacier wastage on southern Adelaide Island, Antarctica, and its impact on snow runway operations. *Annals of Glaciology*. 2005, 41: 57–62.
- Urbini S., Bianchi-Fasani G., Mazzanti P., Rocca A., Vituari L., Zanutta A., Frezzotti M.* Multi-temporal investigation of the Boulder Clay Glacier and Northern Foothills (Victoria Land, Antarctica) by integrated surveying techniques. *Remote Sensing*. 2019, 11 (12): 1501. <https://doi.org/10.3390/rs11121501>.
- White G., McCallum A.* Review of ice and snow runway pavements. *International Journ. of Pavement Research and Technology*. 2018, 3 (11): 311–320.