

УДК 502/504(99-923.1(3))

Редакционная коллегия:

академик НАН Беларуси, д-р геогр. наук, профессор *В.Ф. Логинов*,
д-р физ.-мат. наук, профессор *С.А. Лысенко*,
канд. геогр. наук, доцент *В.А. Рыжиков*,
канд. биол. наук, доцент *Ю.Г. Гигиняк*

Рецензенты:

д-р геогр. наук, профессор *А.А. Волчек*,
д-р геогр. наук, профессор *П.С. Лопух*

Природная среда Антарктики: междисциплинарные подходы к изучению : сб. материалов IV Международной научно-практической конференции, посвященной 15-летию Государственного учреждения «Республиканский центр полярных исследований», Домжерицы, 21–23 сент. 2022 г. / редкол. : В.Ф. Логинов, С.А. Лысенко, В.А. Рыжиков, Ю.Г. Гигиняк. – Минск : БГТУ, 2022. – 284 с.

ISBN 978-985-897-041-3.

В сборник включены доклады IV-й Международной научно-практической конференции, посвященной 15-летию Государственного учреждения «Республиканский центр полярных исследований» (21–23 сентября 2022 года; на базе Государственного природоохранного учреждения «Березинский биосферный заповедник», пос. Домжерицы, Витебская область, Республика Беларусь).

The conference proceeding include papers of the IV International Scientific and Practical Conference “The Natural Environment of Antarctica: Cross-Disciplinary Study Approaches”, dedicated to the 15th Anniversary of the Republican Center for Polar Research (21–23 September 2022; on the basis of the State Nature Protection Institution “Berezinsky Biosphere Reserve”, Republic of Belarus, Vitebsk region, Domzheritsy).

ISBN 978-985-897-041-3

© Институт природопользования
НАН Беларуси, 2022

© Оформление. УО «Белорусский
государственный технологический
университет», 2022

ГЕОРАДАРНЫЕ И ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ КАК ОСНОВА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДИНАМИКИ ЛЕДНИКА (НА ПРИМЕРЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ В РАЙОНЕ АЭРОДРОМА СТАНЦИИ НОВОЛАЗАРЕВСКАЯ)

М.П. Кашкевич^{1*}, С.В. Попов^{1,2,3}, А.С. Боронина^{1,3,4}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;

²АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция», Санкт-Петербург, Россия;

³Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия;

⁴Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия;

**m.kashkevich@spbu.ru*

Аннотация. Площадная георадарная съёмка в совокупности с данными геодезии несёт информацию о направлении движения ледника, позволяет определить области его сжатия и растяжения, выявить наиболее динамически активные участки. Полученная информация не только даёт представление о современном строении ледника, но и совместно с данными термометрии может быть положена в основу математических моделей, способных воссоздать прошлое ледника и осуществлять обоснованный прогноз его развития. В работе приведены результаты комплекса указанных методов, выполненных в период с октября по декабрь 2021 года в районе аэродрома станции Новолазаревская, Восточная Антарктида.

Ключевые слова: георадиолокация; тахеометрическая съёмка; взлётно-посадочная полоса станции Новолазаревская; внутреннее строение ледника; Антарктида.

GPR AND GEODETIC DATA AS THE BASIS FOR MODELLING OF PROCESSES OF GLACIER DYNAMIC (BY EXAMPLE OF ENGINEERING INVESTIGATIONS IN THE NOVO RUNWAY AREA)

M.P. Kashkevich¹, S.V. Popov^{1,2,3}, A.S. Boronina^{1,3,4}

¹Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;

²Polar Marine Geosurvey Expedition, St. Petersburg, Russia;

³Melnikov Permafrost Institute, Yakutsk, Russia;

⁴State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia;

m.kashkevich@spbu.ru

Abstract. Areal GPR mapping together with tacheometric survey helps to determine the direction of glacier movement, demonstrate the areas of its compression and extension, and identify the most dynamically active zones. This information gives us not only an idea of the modern structure of the glacier, but, together with borehole thermometry, forms the basis for mathematical models that can reconstruct the past of the glacier and make a reasonable forecast of its development. The article presents the results of research carried out from late October to mid-December 2021 in the Novo Runway area, East Antarctica.

Keywords: GPR profiling; tacheometric survey; Novo Runway; internal glacier structure; Antarctic.

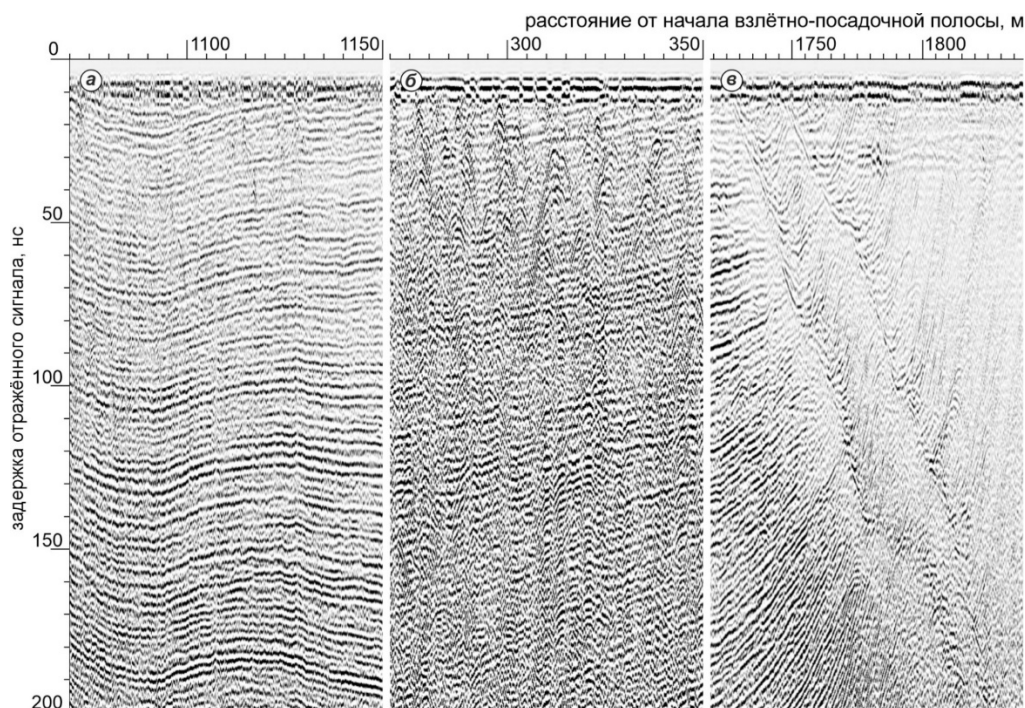
Аэродром в районе российской антарктической станции Новолазаревская (Земля Королевы Мод, Восточная Антарктида) является одним из основных транспортных узлов в индо-атлантическом секторе Антарктики. Будучи включенным в реестр российских аэродромов в декабре 1981 г. [7], он, за исключением перерыва в 90-х годах прошлого века, эксплуатируется уже более 30 лет. Взлетно-посадочная полоса (Novo Runway) расположена на леднике в зоне развития т.н. голубого льда, на котором отсутствует постоянный снежный покров, имеет протяженность 3000 м при ширине 60 м, и способна принимать среднемагистральные тяжёлые транспортные самолеты на колёсном шасси, обеспечивая межконтинентальную связь между г. Кейптаун (ЮАР) и Восточной Антарктидой.

Зоны голубого льда крайне малочисленны, характеризуются отсутствием постоянного снежного покрова и представляют большой интерес для логистического обеспечения антарктических исследований, прежде всего для организации аэродромов [3]. Однако неравномерное движение ледника может

приводить как к формированию опасных ледниковых трещин, так и к изменению конфигурации взлётно-посадочной полосы (ВПП). В сезон 67-ой Российской антарктической экспедиции (РАЭ), с конца октября по середину декабря 2021 г., в соответствии с утверждённым руководством РАЭ программой работ, проводилась оперативная оценка состояния ВПП станции Новолазаревская на предмет выявления приповерхностных трещин и разуплотнений в теле ледника. В то же время понятно, что одно лишь описание строения его приповерхностной части на момент выполнения работ представляет достаточно ограниченный интерес. Гораздо важнее изучить его внутреннее строение и выявить направление и скорость течения отдельных частей ледника, а также сделать прогноз, как может изменяться характер его движения с течением времени и как это скажется на состоянии ВПП и прилегающих областей. Поэтому исследования не ограничивались ВПП, а захватывали и прилегающие к полосе участки. Работы включали в себя георадарное профилирование, тахеометрическую съёмку, бурение и термометрию в скважине [6].

Георадиолокация по праву признана одним из наиболее эффективных дистанционных методов изучения внутреннего строения ледников [2, 4, 5]. Съёмка выполнялась с использованием георадара ОКО-2 (ООО «Логистические системы», Россия). В работах применялись антенны с частотой зондирующих импульсов 150 МГц и 400 МГц. Съёмка проводилась пешим порядком. Для повышения точности в работах использовался одометр, который обеспечивал равномерность регистрации данных по маршруту через каждые 10 см. Плановая привязка осуществлялась по навигационным спутникам систем GPS и GLONASS при помощи Garmin GPSMap 64st (Garmin Ltd., Taiwan). Съёмка в пределах ВПП проводилась по центральной части вдоль её оси, а также по краям со смещением на 30 м в обе стороны от нее. За пределами полосы вдоль неё были выполнены маршруты в 500 и 700 м к югу и в 400 м к северу от оси. Также были сделаны секущие маршруты субортогонально оси ВПП. Общая протяжённость маршрутов составила 17,2 км, площадь съёмки – 1,1 км × 3,3 км. Георадарные данные обрабатывались по стандартной методике [1] с применением компьютерных пакетов Geoscan32 (ООО «Логистические системы», Россия), Prizm v 2.60 (Radar Systems, Латвия), а также ряда программ, разработанных авторами.

Полученное волновое поле в пределах ВПП и на параллельных маршрутах оказалось контрастным и информативным. Так, на временном разрезе на отрезке 3300 м (ВПП, а также боковые и торцевые зоны безопасности) можно выделить три зоны с характерными георадарными образами: 1 – ненарушенные слоистые толщи; 2 – слоистые толщи с мелкими залеченными трещинами; 3 – крупные вертикальные структуры с несогласными контактами (рисунок).



Георадарные образы исследуемых объектов:

- a* – фрагмент временного разреза, демонстрирующий ненарушенное залегание слоёв (зона 1);**
- б* – обильные дифракции от мелких залеченных трещин в начале и конце ВПП (зона 2);**
- в* – фрагмент, демонстрирующий субвертикальный контакт в области сочленения потоков (зона 3)**

Слоистые толщи (зоны 1 и 2), составляющие большую часть обследуемой области ледника, наблюдаются в первой и последней трети ВПП: ненарушенные располагаются ближе к середине, осложненные не крупными (до 15 см) залеченными трещинами – в краевых частях. Наиболее крупные из трещин были разбурены на глубину до 1 м. Они оказались заполнены прозрачным голубым льдом. Пустоты внутри них отсутствовали. Предположительно, в период интенсивного приповерхностного таяния в тёплый сезон года, трещины заполнились талой водой, которая впоследствии замерзала. Исследования, выполненные спустя почти 2 месяца, ближе к середине антарктического лета, показали уже наличие воды в отдельных трещинах, что нашло отражение в виде интенсивных ревербераций на радарограммах.

Центральная часть ВПП (зона 3) существенно отличается по своей волновой картине от остальных. Здесь перестают проследиваться характерные горизонтально-слоистые толщи, и их сменяют вертикальные структуры и несогласные субвертикальные контакты с основной толщей. Это, вероятно, связано со слиянием двух ледовых потоков. Характер их взаимодействия приводит, по-видимому, к пластическим деформациям. В направлении севера эта зона сужается. В частности, на параллельном маршруте, расположенном в 700 м к югу от оси ВПП, ширина зоны составляет 600 м, на самой ВПП сужается до 520 м. Кроме того, от профиля к профилю отмечается явно выраженный наклон западной границы центральной области и контактирующих с ней слоистых структур, что однозначно указывает на то, что направление вектора скорости течения ледника в горизонтальной плоскости меняется не только с расстоянием, но и с глубиной. Полученные временные разрезы явились одной из отправных точек для формирования модели динамики ледника.

Тахеометрическая съёмка осуществлялась для инструментальных измерений деформаций в теле ледника в районе ВПП. Для этого с интервалом 42 дня (31-го октября и 14-го декабря 2021 г.) были выполнены две серии измерений с использованием жёстко закреплённых на местности пунктов. В качестве пикетов использовались знаки аэродромной разметки, установленные через каждые сто метров по обе стороны от оси ВПП. В измерениях применялся тахеометр Trimble M3 DR 5" (*Trimble Navigation Ltd, USA*). Всего было отработано 70 пунктов. Погрешность съёмки оценивается в 0,01 м.

Расчёт деформаций в теле ледника выполнялся в соответствии с методикой, изложенной в ряде работ, в частности [8]. Неравномерное движение ледника порождает в нём напряжения, а они, в свою очередь, приводят к деформациям, которые могут быть инструментально измерены. Величина скорости деформации определяется как относительное изменение расстояния между некоторыми пунктами за единицу времени Δt , т. е.

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

где l_1 и l_2 – начальный и конечный размер. Таким образом, её можно инструментально измерить, что и было сделано в ходе полевых работ путём выполнения двух серий тахеометрических съёмок. Следуя работе [8], скорости деформаций были отдельно рассчитаны для продольного \dot{m}_L и поперечного \dot{m}_T по отношению к оси ВПП направлению. Затем \dot{m}_L и \dot{m}_T были усреднены по соседним сторонам, которые образуют четырёхугольник, и приведены к его середине в виде значений \dot{m}_L и \dot{m}_T соответственно.

Скорости деформаций в продольном направлении (по отношению к оси ВПП) составили от -0,008 год⁻¹ до 0,020 год⁻¹, где положительные значения соответствуют зонам растяжения, а отрицательные – зонам сжатия. Скорости деформаций в поперечном направлении изменяются в более широких пределах: от -0,183 год⁻¹ до 0,016 год⁻¹. Это вполне объяснимо, поскольку направление генерального движения ледника субортогонально оси ВПП, на что указывают материалы рассмотренного выше георадарного профилирования и данные предшествующих геодезических работ АО «Аэрогеодезия». Область максимальных по модулю скоростей деформаций соответствует центральной части полосы (зона 3), интерпретируемой по георадарным данным как участок слияния двух ледниковых потоков.

Таким образом, наиболее стабильной представляется зона 1, а также зона 2 при условии достаточно низких температур, не приводящим к протаиванию и образованию ледниковых стаканов и заполненных водой трещин. Центральная часть полосы (зона 3) на момент исследования также не представляла опасности ввиду отсутствия приповерхностных трещин и ненарушенной сплошности ледяного покрова, однако требует регулярного мониторинга. Все результаты инженерных изысканий будут положены в основу математических моделей динамики ледника, которые помогут осуществить прогноз его дальнейшей эволюции.

Авторы благодарят Российскую антарктическую экспедицию за логистическое обеспечение работ и возможность проведения полевых исследований на столь интересном объекте. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда № 22-27-00266.

Список использованной литературы

1. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 153 с.
2. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. – М.: Научный мир, 2006. – 392 с.
3. Поляков С.П., Мартыанов 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.
4. 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.
5. Попов С.В., Поляков С.П., Пряхин С.С., Мартыанов 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.
6. 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.
7. Ice runway in the area of Novolazarevskaya Station. Initial environmental evaluation. XXV ATCM, 2001, Working Paper WP-015, 40 p.
8. Nye J.F. A method of determining the strain-rate tensor at the surface of a glacier // Journ. of Glaciology. – 1959. – V. 3. No 25. – P. 409–419.