

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

УДК 550.8

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-315-327

ГЕОРАДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНОЙ ПОЛОСЫ НА МОРСКОМ ЛЬДУ В РАЙОНЕ ПОЛЕВОЙ БАЗЫ ОАЗИС БАНГЕРА, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА

А.А. СУХАНОВА¹, С.В. ПОПОВ^{2,1}, С.П. ПОЛЯКОВ³, М.П. КАШКЕВИЧ¹, В.Л. МАРТЬЯНОВ³

¹ — Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Санкт-Петербург, Россия

² — Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург, Россия

³ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

**suhanova.anastassiya@yandex.ru*

GPR RESEARCH FOR THE ORGANIZATION OF THE RUNWAY ON THE SEA ICE IN THE AREA OF THE BUNGER OASIS FIELD BASE, EAST ANTARCTICA

A.A. SUKHANOVA¹, S.V. POPOV^{2,1}, S.P. POLYAKOV³, M.P. KASHKEVICH¹, V.L. MARTYANOV³

¹ — Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg, Russia

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

³ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

**suhanova.anastassiya@yandex.ru*

Received June, 22, 2019

Accepted July, 23, 2019

Keywords: airfield, Bunger Oasis, East Antarctica, georadar profiling, logistical support, transport operations.

Summary

When one is carrying out logistic operations at Russian Antarctic stations, organization and safe operation of snow-runways play an important role. Nowadays six of the seven existing stations and field bases of the Russian Antarctic expedition (RAE) are provided with air communication, however, the Bunger Oasis field base is still outside the air transportation structure. The aim of the

Citation: *Sukhanova A.A., Popov S.V., Polyakov S.P., Kashkevich M.P., Martyanov 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]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-315-327.

investigations described in this paper was to find a safe site for organizing a snow-runway in the area of the Bunger Oasis field base. Taking into account the location of the infrastructure objects of RAE within the Bunger Oasis, the central part of the epishelf Transcription Gulf, situated 7 km away from the base, was chosen as the most appropriate site. During the summer field season of the 64th RAE (2018/2019), a geophysical survey using the GPR (Ground-penetrating radar) method was carried out within the area to obtain data on the thickness of the bay ice. The GPR survey conducted shows that the sea ice thickness varies from 2.9 to 3.1 m. Moreover, no signs of discontinuities in the ice layer were found. The area investigated was identified as a safe site suitable for the landing of light and medium aircraft. However, due to the specificity of the relief of the oasis adjacent to the Bay, the weathering products of the rocks composing the hills migrated to the surface of the ice layer. The effect of solar radiation caused the thawing in the areas of such particles to increase, and this, in turn, led to the formation of cavities on the surface, the dimensions of which do not meet the requirements for runway coatings. As a result, in the area under study, the boundaries of the sites were determined that are suitable for the organization of runways for medium and small aircraft without preliminary rolling of the landing site.

Поступила 22 июня 2019 г.

Принята к печати 23 июля 2019 г.

Ключевые слова: взлетно-посадочная полоса, Восточная Антарктида, георадарное профилирование, логистическое обеспечение, Оазис Бангера, транспортные операции.

В настоящей работе представлены результаты исследований, выполненных в районе полевой базы Оазис Бангера в ходе полевого сезона 64-й РАЭ (2018/19 г.). Целью работ был поиск безопасной площадки для организации посадочной полосы для самолетов средней и малой авиации. Наиболее подходящим местом для возможного аэродрома был выбран покров залива Транскрипция, располагающегося на удалении 7 км от базы. В рамках исследований были выполнены геофизические инженерные изыскания методом георадиолокации для определения мощности льда залива и выявления нарушения целостности ледяного покрова. По результатам работ был найден безопасный участок для приема мало- и среднегабаритных самолетов на лыжных шасси.

ВВЕДЕНИЕ

Авиация играет значительную роль в обеспечении полярных станций и полевых баз. Особенно это важно для Антарктиды, где расстояние между объектами инфраструктуры исчисляется многими сотнями километров. В этом смысле поддержание действующих взлетно-посадочных полос (ВПП) в работоспособном состоянии, а также организация новых является важным аспектом деятельности Российской антарктической экспедиции (РАЭ). Особое внимание при этом уделяется тем посадочным площадкам, которые располагаются в районах развития выводных континентальных и шельфовых ледников [1–4]. Такие участки динамически весьма активны, что приводит к образованию многочисленных трещин [5–8]. В качестве примера можно привести вновь организованную после почти тридцатилетнего перерыва посадочную площадку в районе станции Мирный, где имеется значительное количество таких участков, постоянно изменяющих свою конфигурацию [9]. При этом основная сложность заключается в том, что трещины и полости, представляющие опасность для людей и транспортной техники, зачастую не прослеживаются на поверхности ледника, особенно после обильных снегопадов. Значимую помощь в их выявлении оказывают дистанционные методы: аэрофотосъемка при низком положении Солнца над горизонтом [9] и георадарное профилирование. Последний, как показывает отечественный и зарубежный опыт, весьма эффективен для поиска

скрытых трещин на ледниках [10–15]. Именно результаты георадарных работ позволили в конечном итоге выбрать положение посадочной площадки в районе станции Мирный, на которую в феврале 2016 г. был принят среднемагистральный самолет БТ-67 «Турбобаслер», тем самым было восстановлено авиационное сообщение со станцией, прерванное на четверть века [16].

На настоящий момент в рамках работ РАЭ выполняются комплексные аэрогеофизические исследования на Земле Королевы Мэри в районе отечественной станции Мирный, ввиду чего на действующей ВПП станции во время летних полевых сезонов осуществляется базирование самолета Ан-2. В соответствии с планами Минприроды РФ в дальнейшем предполагается выполнение аэрогеофизических работ и на Земле Уилкса, что подразумевает проведение воздушных операций и над территорией оазиса Бангера. Вследствие этого возникает необходимость в создании посадочной площадки для регулярного базирования авиации в районе полевой базы Оазис Бангера ввиду близости расположения района предстоящих работ.

Еще на ранних этапах геологических исследований на территории оазиса, а именно в период 1-й и 2-й КАЭ (1955–1958 гг.), авиационное обеспечение станции осуществлялось при помощи самолетов Ли-2 и Ан-2. Посадочной площадкой для приема воздушного транспорта в летний период служила ВПП на леднике в 15 км от самой базы, а в зимнее время для транспортных операций в качестве аэродрома использовался ледяной покров озера Фигурное (рис. 1) вблизи базы [17]. После продолжительного перерыва научных работ в районе оазиса исследования были возобновлены в период сезонных работ 32-й САЭ (1986/87 г.), было восстановлено и авиаобеспечение новой полевой базы. В рамках проводимых транспортных операций в этот период были организованы две ВПП: с грунтово-скалистым покрытием в нескольких километрах от станции и ледяным покрытием в пределах залива Транскрипция, находящегося в 7 км от базы Оазис Бангера [18].

Принимая во внимание успешный опыт организации аэродромов ранних экспедиций и необходимость в восстановлении воздушного сообщения района полевой базы Оазис Бангера, в сезон 64-й РАЭ (2018/19 г.) руководством РАЭ перед гляцио-геофизическим отрядом была поставлена задача поиска здесь подходящей и, главное, безопасной площадки для подготовки ВПП для самолетов средней и малой дальности. Необходимость ее создания обусловлена долгосрочными планами геологических работ в этом районе и планами аэрогеофизических исследований.

ВЫБОР МЕСТА ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ПОСАДОЧНОЙ ПЛОЩАДКИ

Как видно из рис. 1, оазис с юга и запада граничит с выводными ледниками Апфела и Эдисто, а на востоке к нему примыкает краевая часть континентального покровного ледника Берега Нокса. С севера, со стороны океана к оазису примыкает шельфовый ледник Шеклтона, ввиду чего сам оазис и полевая база расположены на удалении около 60 км от побережья [17, 18, 19]. По примеру посадочных площадок, организованных на отечественных станциях Прогресс и Мирный, в районе оазиса Бангера также могла бы осуществляться посадка воздушных судов на одном из ледников. Однако подготовка такой посадочной площадки нежелательна по соображениям транспортной доступности: расстояние до полевой базы значительное, при этом расчлененность рельефа затрудняла бы проезд санно-гусеничной техники. Поэтому, после проведения рекогносцировочных работ, предваряющих инженерные изыскания, наиболее перспективным с позиций логистического обеспечения, под-



Рис. 1. Морфология оазиса Бангера [20].

Красным прямоугольником показан район работ в центральной части залива Транскрипция

Fig. 1. Morphology of the Bunger Oasis (Atlas of Antarctica, 1966).

The red rectangle indicates the area of the investigations in the Transcription Gulf

крепленных опытом советских экспедиций, был выбран центральный район залива Транскрипция, показанный на рис. 1.

Залив Транскрипция представляет собой эпишельфовое озеро, с севера примыкающее к леднику Эдисто (рис. 2, а), а с юга ограниченное скальными породами оазиса (рис. 2, б, в). Согласно исследованиям, проводившимся в период с февраля по март 1989 г. в рамках сезонных работ 35-й РАЭ [21], глубина залива в центральной части достигала 100 м, при этом до глубины 70 м вода практически пресная, с соленостью менее 1 ‰, а в нижней части соленость воды достигает значений 25 ‰. Залив, таким образом, имеет связь с морем, что, помимо значительной солености воды, подтверждается наличием приливной трещины, расположенной вдоль береговой линии (см. рис. 2, б, в). На ледовый режим залива влияет большая протяженность берегов, примыкающих к леднику Эдисто, за счет чего залив Транскрипция постоянно охлаждается и не вскрывается ото льда. Мощность последнего летом составляет около 3 м [21]. В южной части залива располагается полевая база Австралийской антарктической экспедиции Эджворт Дэвид, обеспечение которой осуществляется самолетами Twin Otter. Посадочной площадкой для них служит морской лед залива Транскрипция (рис. 2, з).

ГЕОРАДАРНЫЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ

Основные задачи работ заключались в оценке мощности льда залива Транскрипция, а также выявлении нарушений его сплошности, способных привести к аварийным ситуациям на ВПП. Достоверные, не подлежащие сомнению результаты достигаются



Рис. 2. Характер местности, на которой производились инженерные изыскания:

a — торосы ледника Эдисто, *б* — южная оконечность залива, окаймленная сопками, и приливная трещина вдоль береговой линии, *в* — приливная трещина, *з* — самолет Twin Otter Австралийской антарктической экспедиции. Фото А.А. Сухановой

Fig. 2. The character of the area, where engineering surveys were carried out:

a — hummocks of the Edisto glacier, *b* — south side of the gulf, bordered by hills, and a tidal crevasse along the coastline; *v* — the tidal crevasse; *z* — Twin Otter of the Australian Antarctic expedition. Photo by A.A. Sukhanova

бурением. Однако этот метод весьма трудоемок, особенно при необходимости покрытия съемкой значительной территории, поэтому необходимо было найти другой способ определения мощностей ледяного покрова. Недавние исследования авторов [22, 23], а также работы отечественных и зарубежных исследователей [24–27] продемонстрировали эффективность использования георадаров для изучения строения морского льда. Полученный опыт был применен и для работ в оазисе Бангера.

Георадарная съемка осуществлялась пешим порядком. В работах использовался георадар GSSI (Geophysical Survey Systems Inc., USA) с блоком управления SIR-3000 и антенной с частотой зондирующих импульсов 400 МГц. Выполнение контрольного механического бурения для подтверждения достоверной интерпретации геофизических данных производилось при помощи шнекового ледового бура Kovacs (Kovacs Enterprises, USA) с диаметром скважины 50 мм. Плановая привязка на местности осуществлялась при помощи приемоиндикатора Garmin GPS map 64st. Разбивка сети профилей для выполнения георадарных работ выполнялась в соответствии с известными азимутами господствующих ветров, так как именно они, по авиационным требованиям, являются одним из главных критериев выбора главной оси ВПП. Согласно метеорологическим данным Австралийской и Российской антарктических экспедиций, основными азимутами для ориентации главной оси ВПП являются 130° и 90° . В процессе инженерных изысканий, кроме того, был найден перспективный по своей длине и ориентации участок по азимуту 80° . Район проведения гляцио-георадарных работ показан на рис. 3.

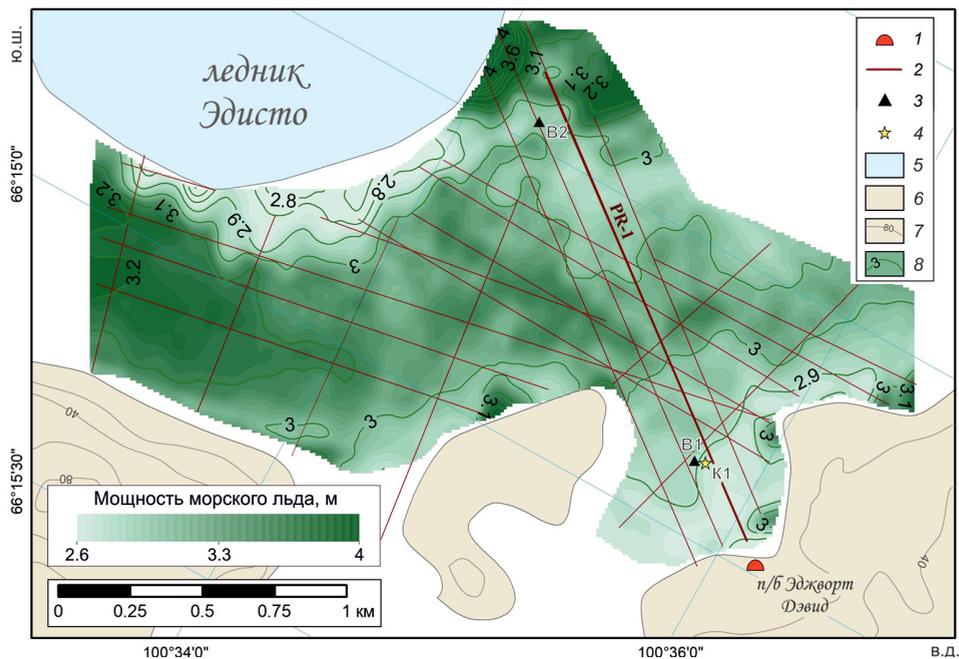


Рис. 3. Район проведения работ и мощность морского льда:

1 — расположение полевых баз в районе работ; 2 — положение георадарных маршрутов; 3 — пункты механического бурения; 4 — пункты кернового бурения; 5 — ледник; 6 — скальные массивы; 7 — изо-
 гипсы высот дневной поверхности в метрах; сечение изолиний — 20 м; 8 — изолинии мощности ледового
 покрова в метрах; сечение изолиний — 0,1 м

Fig. 3. Work area and ice cover thickness in the area of the Transcription Gulf:

1 — field bases in the work area; 2 — GPR lines; 3 — points of mechanical drilling; 4 — points of ice core drilling;
 5 — glacier; 6 — rocks; 7 — contours of absolute heights in meters; contour interval is 20 m; 8 — contours of
 sea ice thickness in meters; contour interval is 0.1 m

В качестве примера на рис. 4 представлен временной георадарный разрез по маршруту PR-1 (см. рис. 3). По всей его длине контрастно выделяется интенсивное отражение 1, связанное с прямой волной. Ниже прослеживается отражение 2, сформированное границей между ледяной толщей и опресненной водой. Оно контрастно выделяется на общем фоне за счет большой разности диэлектрических проницаемостей вышележащей и нижележащей сред [27]. При этом у нижней границы морского льда прослеживается зона 3, в которой наблюдается повышение интенсивности отраженных волн. Причиной этого повышения, вероятно, являются небольшие по размеру трещины, обнаруженные при выполнении кернового бурения в пункте К1 (см. рис. 3), по которым вода просачивается в толщу льда. На наш взгляд, ввиду значительной мощности льда, это не влияет на его прочностные свойства для приема самолетов типа Ан-2 и БТ-67.

Анализ полученных георадарных данных показал, что вблизи ледника Эдисто на временных разрезах прослеживается значимое ослабление сигнала 4, вызванное формированием трещин большого размера. Результатом образования последних является нарушение целостности границы 2. Следует отметить, что ввиду контрастности границы 2 и незначительного ослабления электромагнитных волн во льду про-

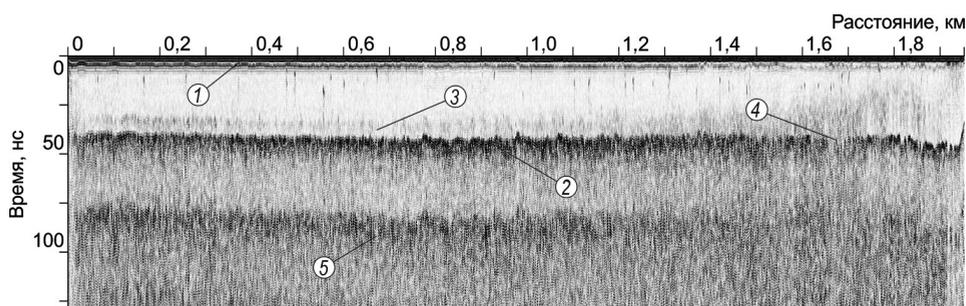


Рис. 4. Временной георадарный разрез:

1 — прямая волна; 2 — граница между ледяной толщей и водой; 3 — обводненная зона в толще льда; 4 — нарушение целостности границы между льдом и водой; 5 — кратная волна

Fig. 4. GPR time-section:

1 — direct wave; 2 — the boundary between the ice and water; 3 — water saturation in the ice; 4 — destruction of the integrity of the ice-water boundary; 5 — multiple wave

исходит многократное переотражение сигнала, фиксируемое на временном разрезе в качестве кратной волны 5. Приведенный временной разрез является характерным для всей выполненной съемки.

Для того чтобы перейти от временного разреза к глубинному, требуется наличие скоростных характеристик лоцируемых сред, что в случае анализа георадарных данных сводится к определению диэлектрической проницаемости. Наиболее простым и точным способом перехода к глубинам является соотнесение временного георадарного разреза с данными бурения. Для этого на начальном этапе был выполнен маршрут, на котором проведено механическое бурение в пункте В1 (см. рис. 3). Зная измеренную толщину льда и временную задержку отраженного сигнала, можно вычислить скорость распространения электромагнитных волн в слое льда и, как следствие, диэлектрическую проницаемость среды. Толщина льда по данным бурения в пункте В1 составила 2,95 м. На временном разрезе в этом пункте задержка отраженной волны от границы между льдом и водой составила 41,02 нс. Исходя из этого, получаем, что скорость распространения волны во льду составляет 143,83 м/мкс, что соответствует диэлектрической проницаемости 4,35 единицы.

Согласно [27], значение диэлектрической проницаемости для льда в среднем принимается равным 3,17, что существенно отличается от полученного в ходе съемки результата. Ее повышение, по всей видимости, связано с наличием трещиноватого обводненного слоя 3 (см. рис. 4). Поскольку скорости распространения электромагнитных волн во льду и в воде отличаются примерно на полпорядка, даже незначительное присутствие последней способно существенно изменить эффективную скорость и связанную с ней диэлектрическую проницаемость [28]. Ввиду технических трудностей, обусловленных отсутствием более глубокой аппаратуры, отбор керна в пункте К1 (см. рис. 3) осуществлялся на глубину 2 м, в то время как по данным контрольного бурения мощность льда составила порядка 3 м. По этой причине не представилось возможным подробно изучить нижнюю часть ледяной толщи, для которой, предположительно, и характерна развитая сеть трещин. Однако при выполнении керна бурения на глубине

0,5 м скважина начинала заполняться водой. В результате подробного стратиграфического анализа ледяного керна было выявлено, что на промежутке от 0,5 м до 1,1 м имеется прозрачный лед, характеризующийся трещиноватой анизотропной структурой. В трещинах также скапливалась вода, образовавшаяся под воздействием процессов интенсивного приповерхностного таяния, что и привело к обводнению и этой трещиноватой зоны льда.

Таким образом, полученное эффективное значение диэлектрической проницаемости, равное 4,35, и было использовано в качестве скоростной модели среды.

В ходе обработки полученных данных в программе Surfer 15.5 (Golden Software Inc., USA) построена схема мощности ледяного покрова в пределах изученной территории. Формирование грида выполнялось по методу Kriging с радиусом осреднения 250 м и расстоянием между узлами сетки грида 30 м. Как следует из схемы, приведенной на рис. 3, в центральной части полигона мощность льда варьирует в среднем в пределах 2,9–3,1 м. В целом прослеживается тенденция к его утолщению в районах, приближенных к торосам ледника Эдисто. Мощность льда на участках, расположенных в южной оконечности залива, несколько меньше, скорее всего, ввиду повышенной аккумуляции тепла за счет дневного нагрева скал. Участки, примыкающие непосредственно к береговой линии, характеризуются локальными повышениями мощности льда, в частности, вблизи австралийской полевой базы Эджворт Дэвид. Возможно, это вызвано воздействием на эти участки активных процессов, связанных с приливной трещиной.

Проведенные инженерные изыскания показывают, что с позиций безопасности, исходя из характера рельефа участка морского льда, отсутствия трещин, а также мощности льда в середине антарктического лета, изученная территория вполне пригодна для организации на ней ВПП. Характерные для толщи льда нарушения целостности и трещины по большей части развиты вблизи ледника Эдисто, и в центральной части полигона они отсутствуют.

При осуществлении геофизических и гляциологических изысканий дополнительно была проведена визуальная оценка состояния ледяного покрытия залива, так как отсутствие неровностей также считается важным критерием при организации посадочных площадок на ледяных поверхностях. В результате было выявлено большое количество каверн, образование которых связано с процессами неравномерного

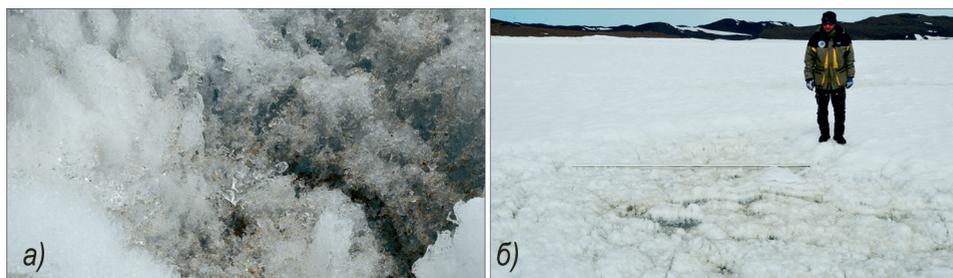


Рис. 5. Оценка состояния покрытия залива Транскрипция.

a — пылевые частицы на поверхности залива; *б* — каверны на поверхности залива. Фото А.А. Сухановой.

Fig. 5. Assessment of the surface condition of the Transcription Gulf.

a — dust particles on the gulf surface; *b* — cavities on the gulf surface. Photo by A.A. Sukhanova

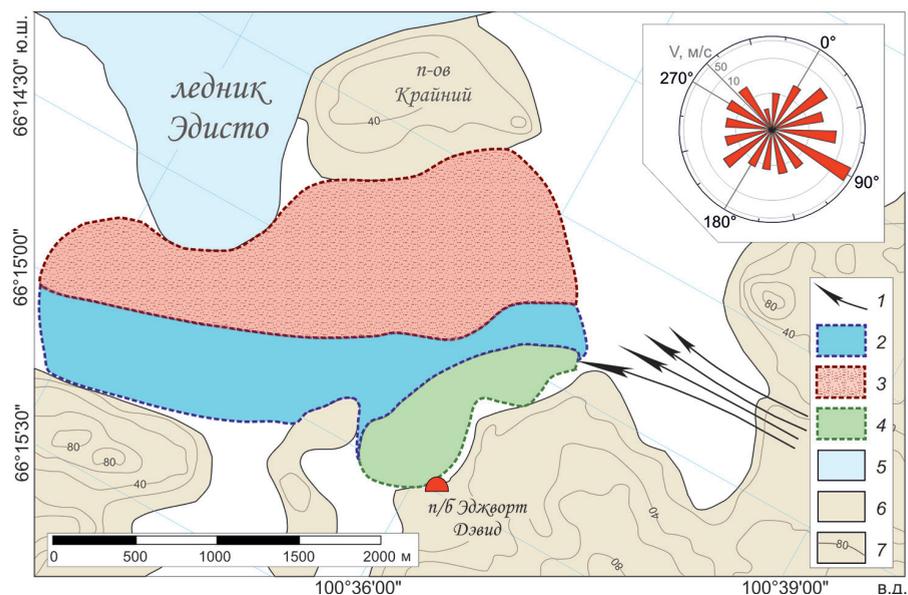


Рис. 6. Оценка безопасности участка залива Транскрипция.

1 — направление преобладающих ветров; 2 — зона для посадки Ан-2; 3 — зона для посадки БТ-67; 4 — зона, не пригодная для посадки самолетов без предварительной подготовки; 5 — ледник; 6 — скальные массивы; 7 — изолинии рельефа, сечение изолиний — 20 м. На врезке приведена роза ветров, построенная по метеоданным летнего полевого сезона 2017/18 г.

Fig. 6. Safety assessment of the area of the Transcription Gulf.

1 — the direction of prevailing winds; 2 — area for landing of An-2; 3 — area for landing of BT-67; 4 — area not suitable for landing of aircraft without preliminary preparation; 5 — glacier; 6 — rocks; 7 — contours of absolute heights; contour interval is 20 m. The insert shows the wind-rose based on the meteorological data collected in 2017/18.

протаивания пылевых частиц на поверхности ледяной толщи (рис. 5, а). Размеры каверн в диаметре нередко достигают 6–7 м при глубине 20–30 см (рис. 5, б), что недопустимо для посадки на таком участке самолетов на лыжном шасси без предварительной подготовки площадки. На рис. 6 стрелками 1 обозначено направление воздушных потоков между двумя сопками, под действием которых и происходит вынос пылевых частиц с поверхности оазиса.

Однако важно отметить, что развитие таких каверн приурочено не ко всей исследованной территории. По результатам визуального обследования полигона были выделены три зоны, для которых характерна различная степень концентрации каверн (рис. 6). Зона № 1 характеризуется ровным рельефом с минимальными неровностями. Именно этот участок используется австралийской экспедицией для приема самолета Twin Otter. Таким образом, эту зону можно считать пригодной для приема планируемых самолетов без какой-либо предварительной подготовки ВПП. Для зоны № 2 характерно наличие небольшого количества застрогов и каверн малых размеров, что несущественно для посадки среднемагистральных самолетов на лыжном шасси. Зона № 3 определена как район развития многочисленных каверн большого размера, что делает невозможным осуществление транспортных операций без предварительной подготовки этого участка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в ходе сезонных работ 64-й РАЭ инженерные изыскания были направлены на поиск подходящей площадки для организации ВПП для приема самолетов типа Ан-2 и БТ-67 в районе полевой базы Оазис Бангера. По результатам работ в центральной части залива Транскрипция выяснено, что мощность льда вполне соответствует критериям, необходимым для организации взлетно-посадочной полосы. Определены границы области, на которой возможна организация аэродрома без предварительной подготовки поверхности.

Настоящие исследования являются еще одним хорошим примером эффективного применения метода георадиолокации для решения задач обеспечения безопасности логистических операций, осуществляемых в полярных регионах нашей планеты. Кроме того, они еще раз доказывают свою высокую результативность не только при работах на ледниках, но и при проведении изысканий на акваториях, покрытых льдом.

Благодарности. Авторы выражают благодарность экипажу ЗАО «Авиалифт Владивосток» за обеспечение логистических операций в рамках проводимых работ и Институту наук о Земле СПбГУ за предоставленную геофизическую аппаратуру.

Acknowledgments. The authors are grateful to the crew of “Avialift Vladivostok” for carrying out logistic operations during the field work and to the Institute of Earth Sciences of St. Petersburg State University for providing the geophysical equipment.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mellor M.* Hard-surface runways in Antarctica. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1988. 87 p.
2. *Abele G.* Snow roads and runways. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1990. 101 p.
3. *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. № 2. С. 31–35.
4. *Кубланов М.С., Чернигин К.О.* Математическое моделирование посадки самолета Ил-76 ТД-90ВД в Антарктиде // Научный вестник МГТУ ГА. 2016. Т. 19. № 6. С. 35–41.
5. *Vaughan D.G.* Relating the occurrence of crevasses to surfaces train rates // *Journal of Glaciology*. 1993. V. 39. № 132. P. 255–266.
6. *Войтковский К.Ф.* Основы гляциологии. М.: Наука, 1999. 256 с.
7. *Van der Veen C.J.* Crevasses on glaciers // *Polar Geogr.* 1999. V. 23. № 3. P. 213–245.
8. *Nath P.C., Vaughan D.G.* Subsurface crevasse formation in glaciers and ice sheets // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2003. V. 108 (B1). ECV 7-1-ECV 7-12. doi:10.1029/2001JB000453.
9. *Пряхин С.С., Попов С.В., Сандалюк Н.В., Мартьянов В.Л., Поляков С.П.* Аэрофотосъемка районов российских антарктических станций Мирный и Прогресс в сезон 2014/15 г. // Лед и снег. 2015. Т. 55. № 4. С. 107–113.
10. *Taurisano A., Tronstad S., Brandt O., Kohler J.* On the use of ground penetrating radar for detecting and reducing crevasse-hazard in Dronning Maud Land, Antarctica // *Cold Reg. Sci. Technol.* 2006. V. 45. P. 166–177.
11. *Zamora R., Casassa G., Rivera A., Ordenes F., Neira G., Araya L., Mella R., Bunster C.* Crevasse detection in glaciers of southern Chile and Antarctica by means of ground penetrating radar // *IAHS Proc.* 2007. V. 318. P. 153–162.

12. *Eder K., Reidler C., Mayer C., Leopold M.* Crevasse detection in Alpine areas using ground penetrating radar as a component for a mountain guide system // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2008. V. XXXVII(B8). P. 837–841.
13. *Singh K.K., Negi H.S., Ganju A., Kulkarni A.V., Kumar A., Mishra V.D., Kumar S.* Crevasses detection in Himalayan glaciers using ground-penetrating radar // *Curr. Sci.* 2013. V. 105. № 9. P. 1288–1295.
14. *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.
15. *Попов С.В., Поляков С.П., Пряхин С.С., Мартьянов В.Л., Лукин В.В.* Строение верхней части ледника в районе планируемой взлетно-посадочной полосы станции Мирный, Восточная Антарктида (по материалам работ 2014/15 года) // *Криосфера Земли.* 2017. Т. XXI. № 1. С. 73–84.
16. *Попов С.В., Межионов С.В., Поляков С.П., Мартьянов В.Л., Лукин В.В.* Гляциогеофизические инженерные изыскания для подготовки летного поля в районе российской станции Мирный, Восточная Антарктида // *Лед и снег.* 2016. Т. 56. № 3. С. 413–426.
17. *Саватюгин Л. М., Преображенская М.А.* Российские исследования в Антарктике. Т. 1 (1 САЭ – 20 САЭ). СПб.: Гидрометеиздат, 1999. 337 с.
18. *Саватюгин Л. М., Преображенская М.А.* Российские исследования в Антарктике. Т. 3 (31 САЭ – 40 САЭ). СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 336 с.
19. *Симонов И.М.* Оазисы Восточной Антарктиды. СПб.: Гидрометеиздат, 1971. 180 с.
20. *Атлас Антарктики.* М.; Л.: Главное управление геодезии и картографии Министерства геологии и охраны недр СССР, 1966–1969. 240 с.
21. *Атлас океанов: Антарктика.* СПб.: Главное управление навигации и океанографии Министерства обороны РФ, 2005. 300 с.
22. *Попов С.В., Поляков С.П.* Результаты гляцио-георадарных опытно-методических работ на морском льду в районе антарктической полевой базы Молодежная в сезон 60-й РАЭ (2014/15 г.) // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2015. № 4. С. 54–62.
23. *Попов С.В., Кузнецов В.Л., Пряхин С.С., Кашкевич М.П.* Результаты георадарных исследований морского льда Нелла фиорда (р-н ст. Прогресс, Восточная Антарктида) в сезон 2016/17 года // *Криосфера Земли.* 2018. Т. XXII. № 3. С. 18–26.
24. *Majjala P., Moore J.C.* GPR investigations of glaciers and sea ice in the Scandinavian Arctic // *Proceedings of the 7th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR'98).* 1998. P. 27–30.
25. *Delaney A.J., Arcone S.A., O'Bannon A., Wright J.* Crevasse detection with GPR across the Ross Ice Shelf, Antarctica // *Proc. Tenth Int. Conf. Grounds Penetrating Radar (GPR 2004).* 2004. P. 777–780. doi.org/10.1109/ICGPR.2004.179867.
26. *Nyland D.* Profiles of floating ice in Arctic regions using GPR // *Lead. Edge.* 2004. V. 23. P. 665–668.
27. *Мачепет Ю.Я.* Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
28. *Looyenga H.* Dielectric constants of heterogeneous mixture // *Physica.* 1965. V. 31. № 3. P. 401–406.

REFERENCES

1. *Mellor M.* Hard-surface runways in Antarctica. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1988: 87 p.
2. *Abele G.* Snow roads and runways. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1990: 101 p.

3. Polyakov S.P., Martyanov V.L., Lukin V.V. Snow-landing runways of the Russian Antarctic Expedition – features of preparation and development prospects. *Rossiyskie polyarnye issledovaniya*. Russian Polar Investigations. 2015, 2: 31–35. [In Russian].
4. Kublanov M.S., Chernigin K.O. Mathematical modeling of plane Il-76 TD-90ND landing in Antarctica. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*. Civil Aviation High Technologies. 2016, 19, 6: 35–41.
5. Vaughan D.G. Relating the occurrence of crevasses to surface strain rates. *Journal of Glaciology*. 1993, 39, 132: 255–266.
6. Voitkovskiy K.F. *Osnovy glyciologii*. Fundamentals of glaciology. Moscow: Nauka, 1999: 255 p. [In Russian].
7. Van der Veen C.J. Crevasses on glaciers. *Polar Geogr.* 1999, 23, 3: 213–245.
8. Nath P.C., Vaughan D.G. Subsurface crevasse formation in glaciers and ice sheets. *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2003, 108 (B1): ECV 7-1-ECV 7-12. doi:10.1029/2001JB000453.
9. Pryakhin S.S., Popov S.V., Sandalyuk N.V., Martyanov V.L., Polyakov S.P. Aerial photography of Russian Antarctic stations Mirny and Progress in summer of 2014/15. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2015, 55, 4: 107–113. [In Russian].
10. Taurisano A., Tronstad S., Brandt O., Kohler J. On the use of ground penetrating radar for detecting and reducing crevasse-hazard in Dronning Maud Land, Antarctica. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2006, 45: 166–177.
11. Zamora R., Casassa G., Rivera A., Ordenes F., Neira G., Araya L., Mella R., Bunster C. Crevasse detection in glaciers of southern Chile and Antarctica by means of ground penetrating radar. *IAHS Proc.* 2007, 318: 153–162.
12. Eder K., Reidler C., Mayer C., Leopold M. Crevasse detection in Alpine areas using ground penetrating radar as a component for a mountain guide system. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2008, XXXVII(B8): 837–841.
13. Singh K.K., Negi H.S., Ganju A., Kulkarni A.V., Kumar A., Mishra V.D., Kumar S. Crevasses detection in Himalayan glaciers using ground-penetrating radar. *Curr. Sci.* 2013, 105, 9: 1288–1295.
14. 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: 82–90. [In Russian].
15. Popov S.V., Polyakov S.P., Pryakhin S.S., Martyanov 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: 67–77. [In Russian].
16. Popov S.V., Mezhonov S.V., Polyakov S.P., Martyanov V.L., Lukin V.V. Glaciological and geophysical investigations aimed at organization of a new airfield at the Station Mirny (East Antarctica). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56, 3: 413–426. [In Russian].
17. Savatyugin L.M., Preobrazhenskaya M.A. *Rossiyskie issledovaniya v Antarktike*. Russian research in the Antarctica. V. 1 (1 SAE – 20 SAE). Leningrad: Hydrometeoizdat, 1999: 337 p. [In Russian].
18. Savatyugin L.M., Preobrazhenskaya M.A. *Rossiyskie issledovaniya v Antarktike*. Russian research in the Antarctica. V. 3 (31 SAE – 40 SAE). Leningrad: Hydrometeoizdat, 2001: 336 p. [In Russian].
19. Simonov I.M. *Oazisy Vostochnoi Antarktidy*. The Oases of East Antarctica. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1971: 180 p. [In Russian].
20. *Atlas Antarktiki*. Atlas of Antarctica. Moscow, Leningrad: Department of Geodesy and Cartography of the Ministry of Geology and conservation of resources of the USSR, 1966: 240 p. [In Russian].
21. *Atlas okeanov: Antarktika*. Atlas of the oceans: Antarctica. St. Petersburg: Department of Navigation and Oceanography of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 2005: 300 p. [In Russian].

22. Popov S.V., Polyakov S.P. Results of the glaciological and GPR tests on the sea ice in the region of Molodezhnaya antarctic field base in the 60-th RAE (2014/15). *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2015, 106 (4): 54–62. [In Russian].
23. Popov S.V., Kuznetsov V.L., Pryakhin S.S., Kashkevich M.P. Results of ground-penetrating radar investigations on the Nella fiord sea ice (Progress station area, East Antarctica) in the 2016/17 Austral summer field season. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2018, XXII, 3: 16–23. [In Russian].
24. Majjala P., Moore J.C. GPR investigations of glaciers and sea ice in the Scandinavian Arctic. Proceedings of the 7th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR'98). 1998: 27–30.
25. Delaney A.J., Arcone S.A., O'Bannon A., Wright J. Crevasse detection with GPR across the Ross Ice Shelf, Antarctica. Proc. Tenth Int. Conf. Grounds Penetrating Radar (GPR 2004). 2004: 777–780.
26. Nyland D. Profiles of floating ice in Arctic regions using GPR. *Lead*. Edge. 2004, 23: 665–668.
27. Macheret Y.Y. *Radiozondirovanie lednikov*. Radio echo-sounding of glaciers. Moscow: Nauchny Mir, 2006: 392 p. [In Russian].
28. Looyenga H. Dielectric constants of heterogeneous mixture. *Physica*. 1965, 31, 3: 401–406.