



Опыт применения низко- и среднечастотных георадаров для изучения внутреннего строения ледника и рельефа подстилающих горных пород в районе оазиса Ширмахера, Восточная Антарктида

М.П.Кашкевич¹✉, А.С.Боронина¹, Е.М.Михайлов², С.В.Попов^{1,3}

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

² Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

³ ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Кашкевич М.П., Боронина А.С., Михайлов Е.М., Попов С.В. Опыт применения низко- и среднечастотных георадаров для изучения внутреннего строения ледника и рельефа подстилающих горных пород в районе оазиса Ширмахера, Восточная Антарктида // Записки Горного института. 2025. Т. 273. № 16597. С. 94-107. [EDN YKPEDU](#)

Аннотация

В ходе экспедиционных исследований 2023-2024 гг. в условиях развития мощного покровного ледника Антарктиды впервые были опробованы усовершенствованные и адаптированные для исследования ледников средние и низкочастотные георадары ОКО-3 с антенной 150 МГц и Тритон-М с раздвижной антенной 25-50-100 МГц (ООО «ЛОГИС», Россия). На примере исследования ледникового покрова в районе оазиса Ширмахера показано, что георадар ОКО-3 позволяет получать детальную информацию о внутреннем строении ледникового покрова до глубин около 200 м и успешно решать задачи гляциостратиграфии. Георадар Тритон-М хорошо зарекомендовал себя для картирования кровли подстилающих горных пород до глубин 250-300 м. В статье представлены новые материалы о структуре ледника в районе посадочной площадки станции Новолазаревская, а также сведения о мощности ледника и рельефе подледного скального основания вблизи оазиса Ширмахера (районы станций Новолазаревская и Майтри). Характерными структурами ледниковой толщи этого района являются пологозалегающие слои, а также сменяющие их крутые складки, осложненные трещинами. Подледный рельеф к югу от оазиса достаточно пологий. Отдельные поднятия и впадины в высоту не превышали 30 м. Граница между льдом и скальным основанием зарегистрирована на протяжении 4,5 км к югу от оазиса. На востоке, примерно в километре от последнего скального обнажения, оазис ограничен резким понижением ложа. Новые данные открывают возможность построения моделей покровного ледника, изучения его динамики и эволюции, установления закономерностей в формировании трещин.

Ключевые слова

георадиолокация; оазис Ширмахера; строение ледника; гляциостратиграфия; подледный рельеф; георадар ОКО-3; георадар Тритон-М

Поступила: 15.10.2024

Принята: 10.04.2025

Онлайн: 02.06.2025

Опубликована: 07.07.2025

Введение

Отечественные радиолокационные исследования в Антарктиде начались в феврале 1964 г., когда сотрудниками Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) были выполнены первые эксперименты по изучению распространения электромагнитных волн в теле ледника [1]. С тех пор этот метод успешно применяется на шестом континенте для изучения строения ледника, подледного рельефа, выяснения состояния подледниковой среды, включая наличие водоемов [1-3].

Позже получили развитие портативные радиолокаторы подповерхностного зондирования – георадары (ground penetrating radar, GPR), обладающие меньшей глубиной исследования, но значительно большей детальностью. Благодаря высокой разрешающей способности и мобильности георадаров были решены многие насущные задачи по обеспечению безопасности логистических операций в Антарктиде. Применение георадаров дает возможность изучать строение ледника и снежно-фирновой толщи, выявлять и оконтуривать опасные зоны ледниковых трещин, снежных



болот, снежниц и прочих гидрографических объектов оазисов для оперативной оценки состояния транспортных узлов и путей сообщения [4-6].

Кроме глубинных радиолокационных исследований объектов, расположенных под километровыми толщами льда, и, напротив, очень детальных георадарных приповерхностных съемок с применением высокочастотных антенн, отдельного внимания заслуживают исследования ледника в диапазоне средних глубин (первые сотни метров) с применением средне- и низкочастотных антенн от 25 до 150 МГц. Получаемые при этом данные позволяют изучить особенности внутреннего строения ледниковых толщ и построить их трехмерные модели. Появляется возможность картировать складчатые структуры в леднике и нарушения в них путем прослеживания маркирующих горизонтов, устанавливать корреляцию между элементами складок и областями развития трещин, выявлять и оконтуривать отдельные ледовые потоки и зоны их сочленения. Эти данные служат основой для моделирования процессов, протекающих в ледниках. Подобные георадары, кроме внутреннего строения ледника, позволяют картировать подледный рельеф, имеющий ключевое значение при формировании слоев в ледниковых толщах. От него зависит направление ледовых потоков, вероятность появления трещин и развития внутриледниковых каналов. Представление о мощности ледникового покрова важно само по себе и является необходимой первичной информацией при математическом моделировании динамики ледника и процессов тепломассопереноса в нем [7-9]. Кроме того, картирование подледного рельефа является актуальной задачей и с точки зрения обеспечения безопасности транспортных операций и размещения инфраструктуры. В областях с ровными субгоризонтальными границами подстилающих пород с большой долей вероятности стоит ожидать ненарушенные толщи льда, которые представляются наиболее стабильными и безопасными участками. Напротив, ярко выраженный рельеф, перепады высот, большие углы наклона стенок скального основания являются предпосылками для развития деформаций и формирования различного рода нарушений в теле ледника, препятствующих его эксплуатации для организации путей сообщения, возведения сооружений и т.д. Однако задача картирования подледного рельефа с необходимой степенью детальности не является простой. Высокие сопротивления льда [10] и значительные глубины исключают применение электротомографии. Сложные условия возбуждения упругих колебаний ограничивают применение малоглубинной сейсморазведки. Магнитотеллурические методы, метод переходных процессов и другие электромагнитные методы с незаземленными линиями, физические основы которых основаны на уравнении диффузии, не обеспечивают требуемой детальности. Наиболее пригодным методом для решения поставленной задачи представляется георадиолокация с использованием низкочастотных антенн и аппаратуры с большой длиной записи.

В настоящей статье авторы делятся своим опытом применения на покровном леднике Антарктиды двух георадаров, разработанных в компании ООО «ЛОГИС» (Россия) – ОКО-3 с экранированной антенной АБ-150 (центральная частота 150 МГц) и Тритон-М с раздвижными неэкранированными антеннами 25-50-100 МГц.

Краткий обзор радиолокационных исследований в Антарктиде

Радиолокация применяется для изучения ледников с середины прошлого века. Первые отечественные исследования по применению этого метода проводились на станции Мирный в феврале 1964 г. сотрудниками отдела физики льда и океана ААНИИ. Затем через два года были проведены первые эксперименты с локатором, установленным на борту самолета Ил-14, а в феврале 1968 г. на Земле Эндерби была выполнена первая отечественная площадная аэроадиолокационная съемка. В 1967 г. в ААНИИ разработан первый отечественный ледовый локатор для изучения мощных полярных ледников РЛС-60-67 [1]. Аналогичные зарубежные исследования проводились сотрудниками Британского института полярных исследований (SPRI) в декабре 1963 г. на шельфовом леднике Бранта [11].

Начиная с 70-х годов прошлого века, радиолокационные исследования стали основным методом изучения ледника и подледной среды, превзойдя сейсморазведку, используемую ранее для этой цели. Основное достоинство радиолокации заключается в эффективности, особенно в авиационном варианте. В настоящее время практически вся Антарктида, за исключением отдельных внутренних районов, покрыта радиолокационными исследованиями, что позволило получить



достаточно точное представление о мощности ледникового покрова и рельефе подледной поверхности [12]. Обычно для выполнения исследований на мощных ледниках используются частоты метрового диапазона. Это связано с приемлемым поглощением в леднике (которое зависит от частоты) и с размерами антенн, которые критичны для установки на самолет. В отечественной практике долгое время применялись ледовые локаторы с частотой зондирующих импульсов 60 МГц, в последнее время используется прибор с частотой 130 МГц. Обширный обзор по этим видам исследований приводится в работах [1, 3] и др.

Ледовые локаторы, обладая большой мощностью (до 80 кВт) и достаточно широким зондирующим импульсом (до 1 мкс), позволяют успешно лоцировать многокилометровые ледники. Однако по тем же причинам они не могут обеспечить детальность исследований приповерхностной части, при этом именно она представляет значительный интерес как для гляциологии, так и для решения инженерных задач, в частности, обеспечения безопасности транспортных операций путем выявления трещин в теле ледника. Для этой цели используются георадары, обладающие гораздо меньшей мощностью и длительностью зондирующего импульса. После открытия озера Восток [13, 14] метод радиолокации начал активно применяться для выявления и изучения подледниковых водоемов [15-18].

Хорошо себя зарекомендовали высокочастотные георадары (400-900 МГц) для исследования верхней части ледника до глубин 20 м. Первые примеры их успешного применения нашли отражение в работах зарубежных авторов и относятся как к исследованиям ледников Антарктиды, так и горных ледников [2, 19, 20]. С 2013 г. георадары на регулярной основе используются специалистами Российской антарктической экспедиции (РАЭ) для обеспечения безопасности транспортных операций, строительства объектов инфраструктуры и других инженерных задач. Георадиолокационные исследования включают в комплекс гляцио-инженерных изысканий, где они занимают ведущее место среди других методов. Георадары с антеннами указанных частот позволяют выявлять трещины и определять их морфологию, оценивать мощность льда над водоемами, маркировать и оконтуривать опасные зоны на ледниках и снежно-фирновых толщах. В качестве примера можно привести работы по выбору места для строительства аэродрома на станции Мирный, выявлению трещин на участках трассы следования санно-гусеничного похода «Прогресс – Восток» и изучению озера, образовавшегося на месте обширного провала в леднике Долк в районе станции Прогресс [21, 22].

Вблизи станции Прогресс в течение нескольких лет проводились георадиолокационные исследования, позволившие организовать безопасную трассу между станцией и аэродромом [1], выбрать площадки для организации склада хранения топлива, провести обследование участка ледника на предмет наличия трещин, на котором разгружаются научно-экспедиционные суда [23]. Большую роль высокочастотная георадиолокация играет и при организации посадочных площадок в Антарктиде, включая как поиски подходящих участков для последующего строительства, так и обследование действующих взлетно-посадочных полос (ВПП) [24, 25]. В качестве примеров можно привести мониторинг международной посадочной площадки станции Новолазаревская [26], строительство новой взлетно-посадочной полосы «Зенит» вблизи станции Прогресс, поиск безопасных участков на леднике для организации аэродромов вблизи станций Русская и Мирный, а также полевой базы Оазис Бангера. Кроме того, георадиолокация оказывает важную помощь для изучения многолетнемерзлых пород, в том числе и в Антарктиде [27-29].

В сравнении с мощными радаром, обеспечивающими глубинность в сотни и даже первые тысячи метров, а также высокочастотными антеннами, используемыми для детального изучения верхней части разреза, незаслуженно мало внимания уделяется низко- и среднечастотным радарам с диапазоном частот 25-150 МГц. Именно они дают возможность детально изучать строение ледниковой толщи до глубин около 200 м, получать данные о морфологии озерных котловин при мощности водной толщи в несколько десятков метров, картировать подледное скальное основание на глубинах 250-300 м [30, 31]. Эти данные являются основой для построения моделей ледников и снежно-фирновых толщ, которые помогают в изучении вопросов динамики и эволюции таких сред.

К примеру, в районе станции Майтри (оазис Ширмахера, Восточная Антарктида) индийским коллегам удалось получить отражение от дна озера L-75 на глубине 34 м, а также отражение от кровли скальных пород под ледником на глубине около 180 м при помощи георадара с антенной 80 МГц [32].



Исследователи РАЭ, начиная с 2017 г., выполняли работы на системе озер Болдер – Ледяное – Долк, а также на провале, образовавшемся на месте озера Долк (район полевой базы Прогресс-1, оазис Холмы Ларсеманн). В работах применялись георадары с набором антенн разной частоты: 900, 500, 200, 150 и 75 МГц. Для получения отражений от дна в наиболее глубоких впадинах указанных озер использовали антенну с частотой 75 МГц. Так, на озере Болдер зарегистрированы отражения при толщине водной массы более 40 м [22]. Новые данные о строении озера Прогресс, в частности его подледниковой части, удалось получить, используя антенны 500 и 38 МГц [33].

В исследовании [29] представлены результаты работ с георадаром GSSI SIR-20 и частотой зондирующих импульсов 100 МГц на границе ледяного купола с оазисом Холмы Ларсеманн, нацеленные на картирование кровли коренных пород под ледником. Максимально возможная глубина зондирования составила 89 м, максимальная глубина идентифицируемых слоев ледника 75 м. Авторы [29] отметили возможность выявления областей скопления талой воды в понижениях скального рельефа при анализе волнового поля.

Для изучения горных ледников Памира, Кавказа, Полярного Урала успешно применяется георадар ВИРЛ-7 (20 МГц). В работе [34] на основе съемок с георадаром ВИРЛ-7 произведен подсчет изменения объема ледника Абрамова на Памире за последние 32 года. Максимальное значение мощности льда составило 219 м. Подобные работы по оценке изменения мощности льда на Эльбрусе за период с 1997 по 2017 гг. выполнялись с использованием георадара ВИРЛ-6 (20 МГц), закрепленного на вертолете [35]. Максимальная мощность льда получена авторами на леднике Большой Азау и составила $237 \pm 12,6$ м.

Активно и успешно применяют георадары с антеннами разных частот при изучении ледников Шпицбергена. В частности, георадар Pulse Ekko с антенной 50 МГц позволяет получать отражения от границ в толще ледника на глубинах более 250 м. Авторы работ [36-38] демонстрируют положительный опыт при картировании подстилающего скального основания, изучении распространения фрагментов теплого льда в теле ледника и выделении внутриледниковых каналов. Значительный вклад метод георадиолокации вносит в изучение ледников и грунта Гренландии [39, 40], а также Исландии и островов Канадского архипелага [41, 42].

Район работ и объекты исследования

Район работ располагается в окрестностях оазиса Ширмахера (Восточная Антарктида), включая его восточную оконечность, а также область к югу, где на ледниковом куполе, примерно в 7 км от оазиса имеется посадочная площадка станции Новолазаревская (рис.1). Объектами исследования

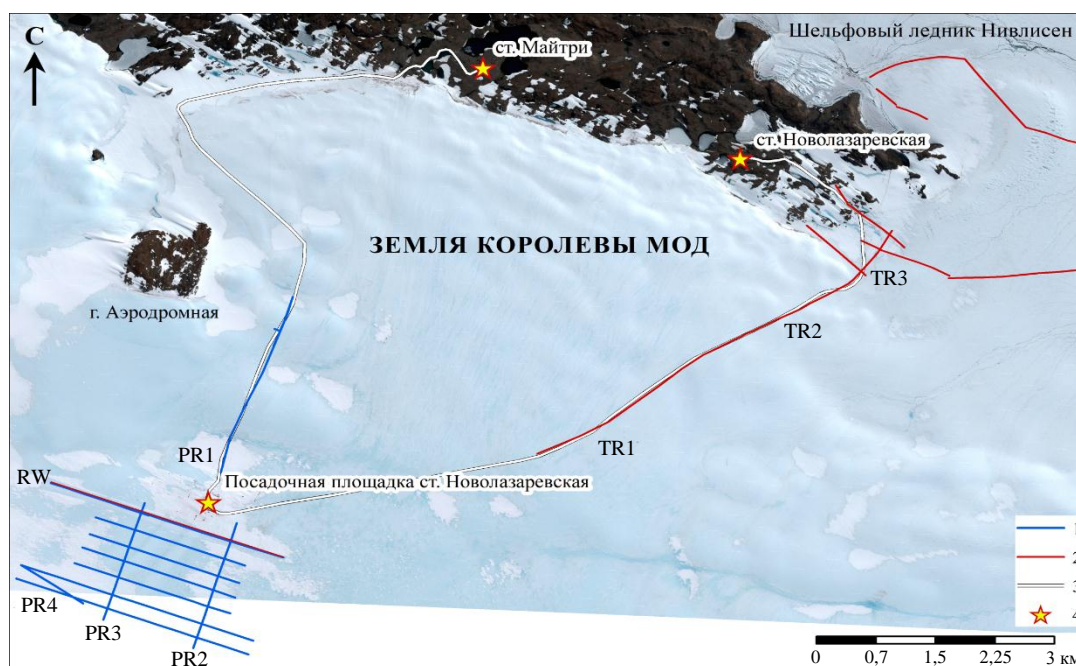


Рис.1. Схема расположения района георадарных профилей

1 – профили, выполненные георадаром ОКО-3, АБ-150; 2 – профили, выполненные георадаром Тритон-М, антенна 25 МГц;
3 – трасса; 4 – объекты инфраструктуры



были выбраны подледное скальное основание в продолжении оазиса Ширмахера и сам покровный ледник.

Картирование рельефа подледного скального основания проводилось по системе маршрутов, расположенных к востоку от оазиса, а также к югу вдоль трасс, соединяющих российскую станцию Новолазаревская и индийскую станцию Майтри с посадочной площадкой. При выполнении этих работ профили были проложены от скальных выходов оазиса Ширмахера и вблизи горы Аэродромной для надежного картирования подледной поверхности. Начало профилей закладывалось на участках с плавным рельефом горных пород в местах их выхода на дневную поверхность, чтобы избежать боковых отражений от скальных стенок с крутым падением. По этой же причине маршруты не располагались вблизи вертикальных стенок ледникового купола. Разбивке профилей по регулярной сети мешало обилие рек и ручьев, проработавших русла в леднике глубиной более 1 м, а также наличие снежных болот в низинах. Перепад высот на профиле вдоль трассы к посадочной площадке (маршрут TR1) составил около 270 м от абсолютных отметок высот от 144 до 157 м в юго-восточной части оазиса до отметки 420 м в 4,8 км к югу на ледниковом куполе. В широтном направлении высоты менялись незначительно, максимальный перепад составил 14 м.

В пределах самой ВПП, где абсолютные отметки дневной поверхности составляют от 548 до 570 м, отражение от скального основания на радарограммах зафиксировано не было из-за большой мощности ледникового покрова. В сезон 67-й РАЭ (ноябрь – декабрь 2021 г.) авторами были получены первые данные о внутреннем строении ледника в пределах ВПП и в окрестностях посадочной площадки. Тогда была выявлена зона сочленения ледовых потоков и прилегающие к ней с запада и востока системы складок. В ходе настоящего исследования в сезон 69-й РАЭ (декабрь 2023 г. – февраль 2024 г.) авторами был выбран указанный участок для опытно-методических работ по оценке возможностей обсуждаемой аппаратуры для изучения внутреннего строения ледника до глубин 150 м, включая картирование складчатых структур и другие его особенности.

Аппаратура, методика полевых работ и обработки данных

Георадар Тритон-М с неэкранированной раздвижной антенной 25-50-100 МГц и усовершенствованный георадар ОКО-3 с экранированной антенной 150 МГц с большой длиной записи, адаптированные для исследования ледников, впервые были опробованы в условиях развития мощного покровного ледника Антарктиды. Георадарная съемка была начата с выполнения опытно-методических работ. Они были направлены на выбор оборудования (тип радара и центральная частота антенн) и режимов съемки (количество накоплений, градуировка колеса, развертка, количество точек на трассу и пр.). Цель – сравнение аппаратуры и выбор оптимальных параметров для картирования подледного рельефа и изучения внутреннего строения ледника на глубинах более 100 м.

Съемка проводилась пешим порядком (рис.2). При работе с Тритон-М запись производилась в непрерывном режиме (рис.2, а). При работе с георадаром ОКО-3 с антенной 150 МГц для повышения точности использовался одометр, который обеспечивал равномерность регистрации данных по маршруту через каждые 10 см (рис.2, б). Плановая привязка георадарных маршрутов осуществлялась с помощью DGPS комплекса EFT M2 GNSS (рис.2, в), а при удалении от геодезического пункта на станции Новолазаревская более чем на 3 км – с помощью спутникового приемоиндикатора Garmin GPSMap 64st по навигационным спутникам систем GPS и GLONASS. Поскольку съемка выполнялась в условиях пересеченного рельефа и значительных превышений, через каждые 100 м в характерных точках рельефа были отсняты точки плановой и высотной привязки. На радарограммах такие пункты были отмечены инструментом «маркер». Затем при камеральной обработке после проведения интерполяции каждая трасса приобретала свою координату. Такая методика обеспечивает точность плановой привязки искомых объектов до первых десятков сантиметров. При обработке и построении глубинных разрезов были учтены высоты дневной поверхности.

Регистрация данных и последующая обработка выполнялись в программах CartScan и Geoscan32 (ООО «Логические системы», Россия) по стандартной методике, которая включала в себя удаление «стоянок», корректировку длины профиля в соответствии с данными спутниковой привязки, регулировку яркости, контраста и усиления, в отдельных случаях применение фильтров и введение рельефа дневной поверхности.

Сложность при обработке и последующей интерпретации георадарных данных часто связана с выбором кинематической модели среды, от которой зависит корректность пересчета временных

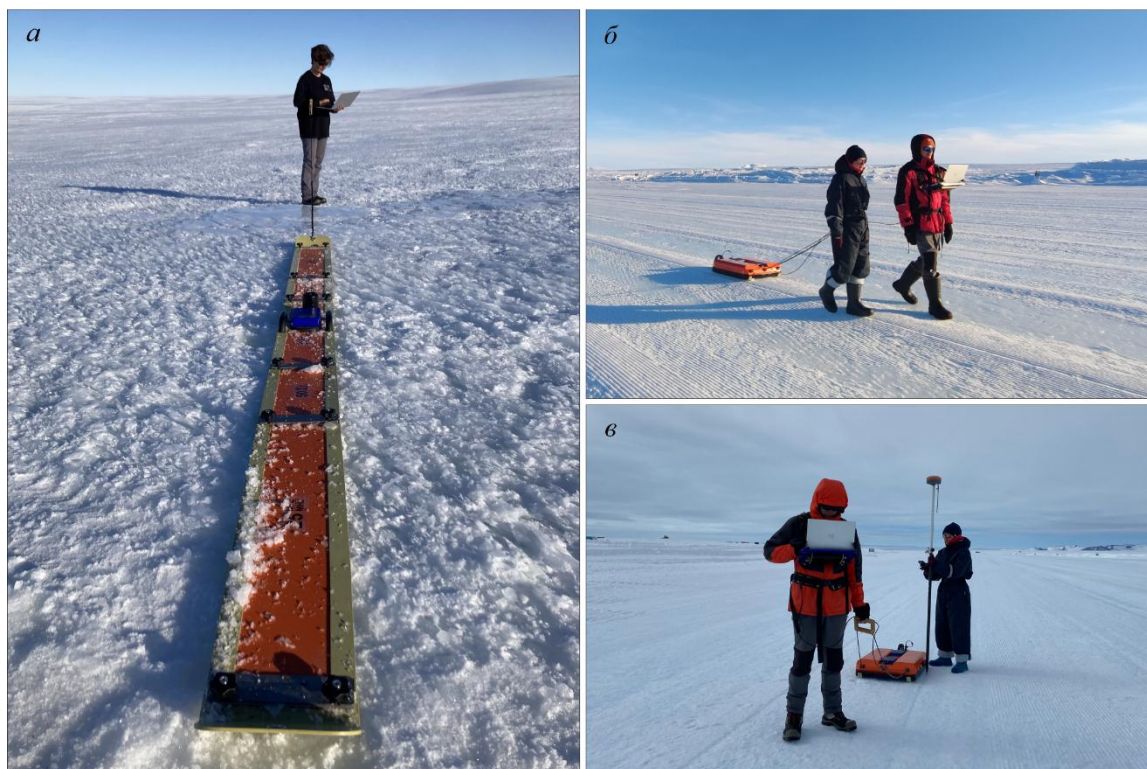


Рис.2. Выполнение опытно-методических работ в районе посадочной площадки Новолазаревская

разрезов в глубинные. В нашем случае ситуация упрощается, поскольку район работ расположен на «голубом льду», для которого характерно либо полное отсутствие снежного покрова, либо его мощность весьма незначительна. Таким образом, пересчет временного георадарного разреза в глубинный осуществлялся в рамках модели однородной среды с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3,17$, что соответствует скорости распространения электромагнитных волн 16,8 см/нс. Оценка ϵ льда была выполнена по многочисленным годографам дифрагированной волны в леднике и методом общей глубинной точки (ОГТ). Работы методом ОГТ выполнялись с использованием георадара ОКО-2 с раздвижными антеннами АБ-150. Генераторная и приемная антенны разносились симметрично относительно центра с шагом 0,5 м. Максимальный разнос составил 20 м. Расстановки для работ методом ОГТ располагались на участках с горизонтальными границами подледного скального основания, для чего предварительно выполнялась георадарная съемка по системе перпендикулярных профилей. Полученные значения диэлектрической проницаемости и, соответственно, скорости распространения электромагнитных волн хорошо согласуются с аналогичными характеристиками льда, рассмотренными в публикациях [43, 44]. Заверка положения границ по глубине в пределах исследуемого ледника неоднократно осуществлялась с использованием шнекового бурения в рамках работ по изучению озер, перекрытых льдом, и внутриледниковых тоннелей. Ошибка составила не более 3-4 %.

Георадар Тритон-М. Форма и строение антенны георадара Тритон-М (раздвижная гибкая монолыжа) позволяют без труда перемещать ее по поверхности ледника, огибая снежные наметы, заструги и прочие неровности. Также к преимуществам можно отнести отсутствие проводов, кабелей и прочих соединений, которые сильно осложняют работу в условиях низких температур, снега и сильного ветра. Автономный блок регистрации и управления связан с ноутбуком по Wi-Fi. В ходе работ были опробованы разные комбинации параметров съемки: частота зондирующего импульса, длина записи, количество точек на трассу.

На профиле RW вдоль оси взлетно-посадочной полосы на отрезке 1300 м от начала была выполнена съемка с антенной 25 МГц, разверткой 1600 нс и количеством точек на трассу, равным 1024. На полученной радарограмме (рис.3, а) видно, что первые 100 нс, соответствующие 9-метровой толще льда, зашумлены ввиду низкочастотного сигнала и контрастного отражения, предположительно от оператора. Многочисленные реверберации, также маскирующие верхнюю часть георадарного разреза, соответствуют мелким трещинам, преимущественно залеченным. Трещины

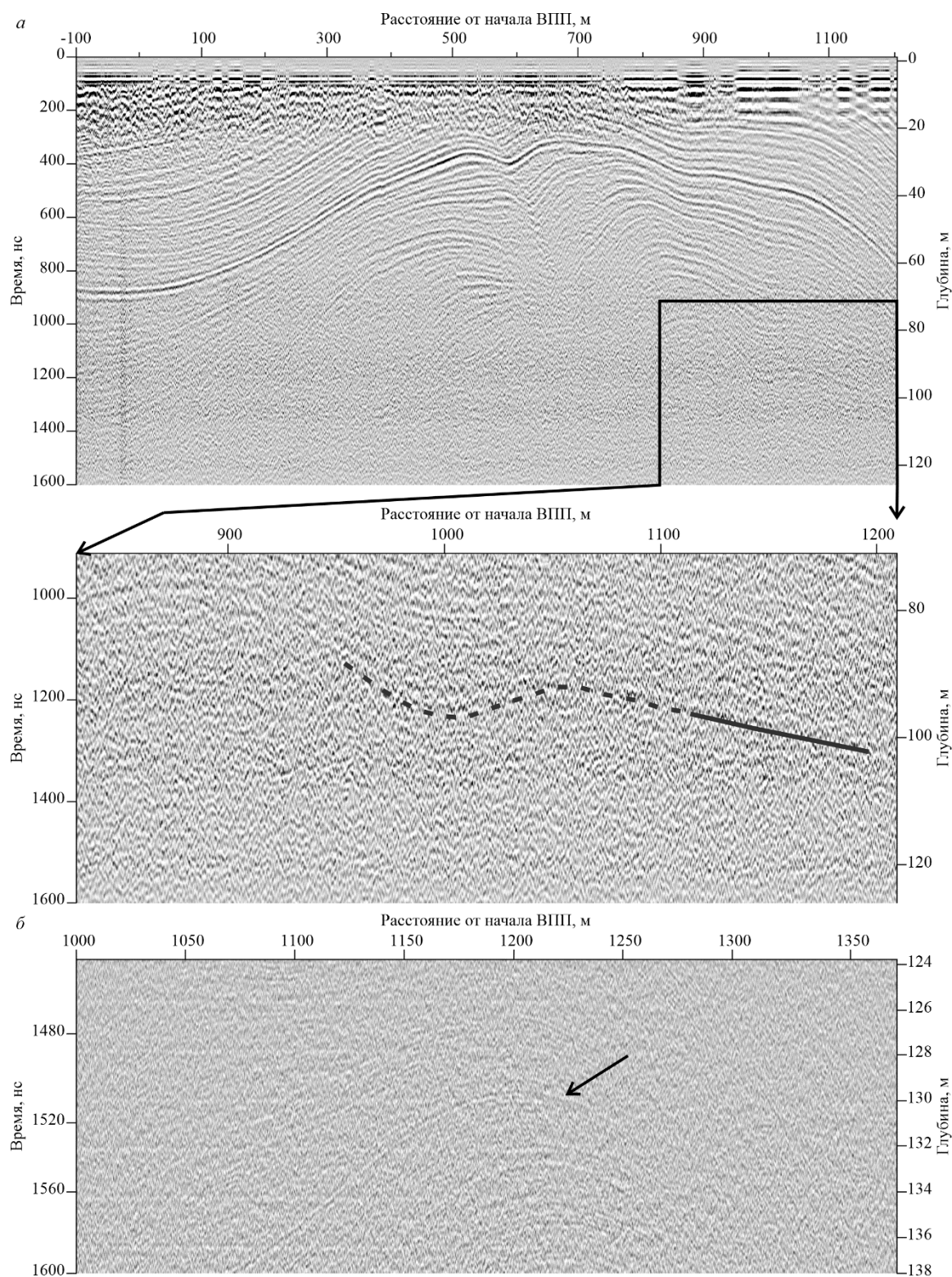


Рис.3. Георадарный разрез по профилю RW вдоль центральной оси ВПП:
а – полученный георадаром Тритон-М с антенной 25 МГц (на врезке представлен укрупненный участок, выделенный квадратом); б – полученный георадаром ОКО-3, антенна АБ-150, стрелка указывает на один из слоев в теле ледника

имеют сезонный характер, возникают на открытых участках льда в весенний период (октябрь – ноябрь) из-за резких перепадов температур днем и ночью. В период антарктического лета эти мелкие трещины заполняются водой, затем промерзают и, как правило, полностью залечиваются.

На больших временах записи контрастно проявляется слоистость в леднике. Так, до отметки 1200 нс (глубина около 100 м) еще видны оси синфазности (рис.3, а, врезка). Наблюдаемые на



радарограммах слои отражают процессы накопления льда и являются слабо отличимыми по диэлектрической проницаемости. Феномен формирования интенсивных отражений на радарограммах при слабой дифференциации слоев по электрофизическим свойствам можно объяснить низким затуханием электромагнитной волны в однородной и высокоомной среде. Именно такой средой и является лед, где наличие даже незначительных неоднородностей на контакте двух слоев оказывается достаточными, чтобы сформировать отражение высокой амплитуды. Такими неоднородностями предположительно могут быть разная плотность прослоев, содержание минеральных включений, а также форма, ориентировка, размер кристаллов, что объясняется различными погодными условиями в период снегонакопления и его метаморфизма. Таким образом, учитывая минимальное отличие по диэлектрической проницаемости в слоях в теле ледника, полученный результат можно считать вполне удовлетворительным.

Георадар ОКО-3. Впервые в условиях Антарктиды опробован усовершенствованный георадар ОКО-3 с антенным моноблоком АБ-150 (см. рис.2, б), который позволяет устанавливать большую длину записи, пропорционально увеличивая при этом количество точек на трассу. Это делает его гораздо более приспособленным для исследования ледников и выгодно отличает от аппаратуры предыдущего поколения ОКО-2, где длина записи была ограничена количеством дискретов на трассу (512 точек), что на развертке 1600 нс делало радарограмму практически нечитаемой, оси синфазности прослеживались плохо, слои оказывались разбиты на прямоугольники.

На рис.3, б приведен фрагмент разреза по маршруту RW (центральная часть), полученный с георадаром ОКО-3, АБ-150 с разверткой 1600 нс и количеством точек на трассу 2048. Благодаря слабому затуханию электромагнитной волны в материковом льду и отсутствию контрастных границ в верхней части разреза амплитуды сигнала хватает, чтобы сформировать четкий отраженный сигнал даже на максимальных временах записи. Благодаря высокой разрешающей способности из-за достаточного количества дискретов и мощной генераторной антенне слои в леднике хорошо различимы на глубине более 130 м.

Сравнение георадаров ОКО-3 и Тритон-М для изучения внутреннего строения ледника. В ходе опытно-методических работ было выполнено сравнение временных разрезов с длиной записи 800 нс, полученных на одном и том же участке профиля RW при использовании георадара ОКО-3 с антенным блоком 150 МГц (рис.4, а) и георадара Тритон-М с частотой 50 МГц (рис.4, б).

Из-за отсутствия контрастных целевых границ в ледниковой толще, незначительной разницы в диэлектрической проницаемости исследуемых объектов и зачастую их несущественных размеров

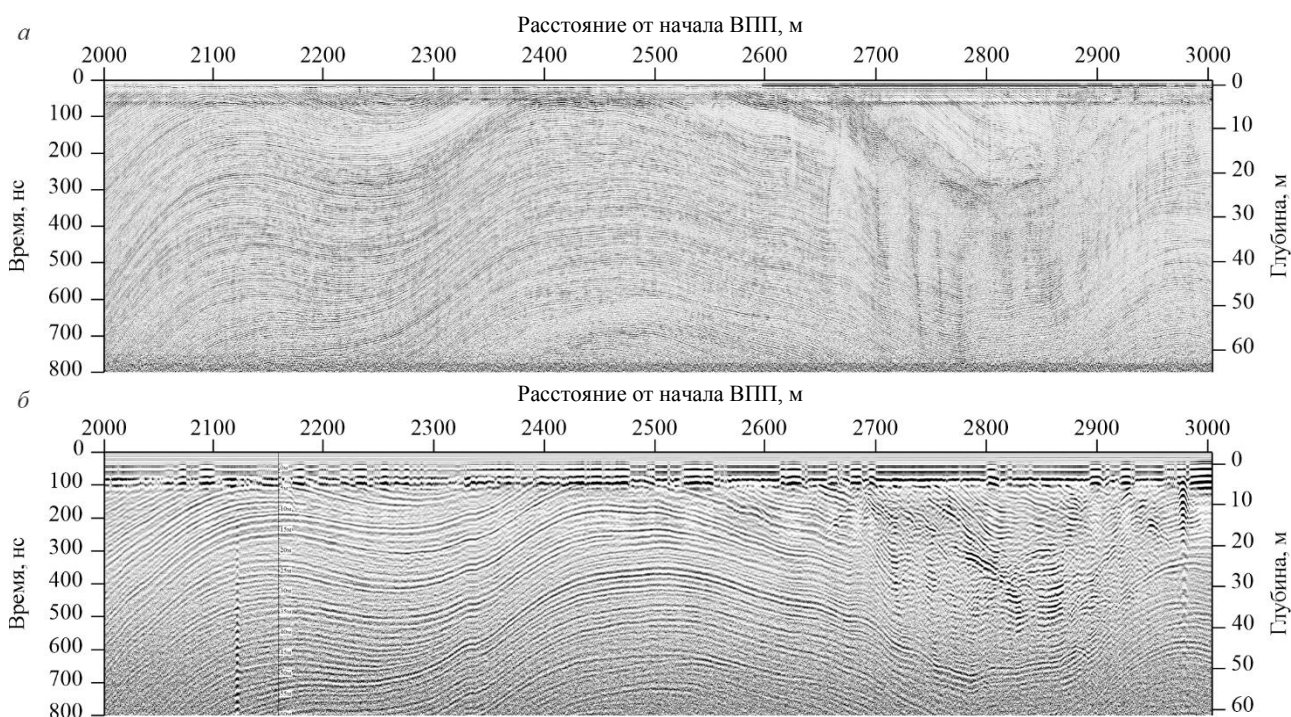


Рис.4. Георадарные разрезы по профилю RW



(прослой льда, различающиеся степенью метаморфизма и наличием минеральных включений; трещины, заполненные воздухом, снегом или залеченные льдом) для изучения внутреннего строения ледника более эффективно использование георадара ОКО-3 с антенной АБ-150.

Антенный блок АБ-150, с одной стороны, обладает мощным генератором, что обеспечивает необходимую глубину исследования и позволяет при использованной развертке уверенно проследить внутреннее строение ледника до глубины 65 м, с другой – имеет достаточную разрешающую способность (в горизонтальном направлении и по вертикали выделяются слои мощностью менее 0,5 м). На обоих представленных разрезах (рис.4) одинаково четко прослеживаются складки и крупные структуры. Однако отдельные трещины, их размеры и морфология на радарограммах, полученных с аппаратурой Тритон-М, определяются значительно хуже. Кроме того, незранированная антенна, используемая в георадаре Тритон-М, регистрирует дополнительные отражения от техногенных металлических объектов на поверхности, таких как металлические фрагменты знаков разметки ВПП и других (120 и 980 м от начала профиля), что представляет собой дополнительные помехи и может маскировать полезную информацию.

Сравнение георадаров ОКО-3 и Тритон-М для картирования скального основания. Возможности георадаров с использованием максимальных разверток (3200 нс для Тритон-М и 6400 нс для ОКО-3 с АБ-150) для картирования кровли подстилающих горных пород были опробованы на двух параллельных профилях меридионального направления на ледниковом куполе примерно в 4 км к югу от оазиса Ширмахера. Съемка с георадаром Тритон-М проходила по маршруту TR1 вдоль трассы, соединяющей станцию Новолазаревская с посадочной площадкой, а с георадаром ОКО-3 – в 4,5 км западнее (маршрут PR1) вдоль трассы к станции Майтри вблизи горы Аэродромная (см. рис.1).

На рис.5 представлено сравнение георадарных разрезов, полученных с ОКО-3 и Тритон-М при одинаковой мощности ледникового покрова (250-260 м), что соответствует отражениям от подстилающих горных пород на временах 3000-3200 нс. Как и следовало ожидать, мощность испускаемого импульса георадара ОКО-3 уступает георадару Тритон-М. Кроме того, частота

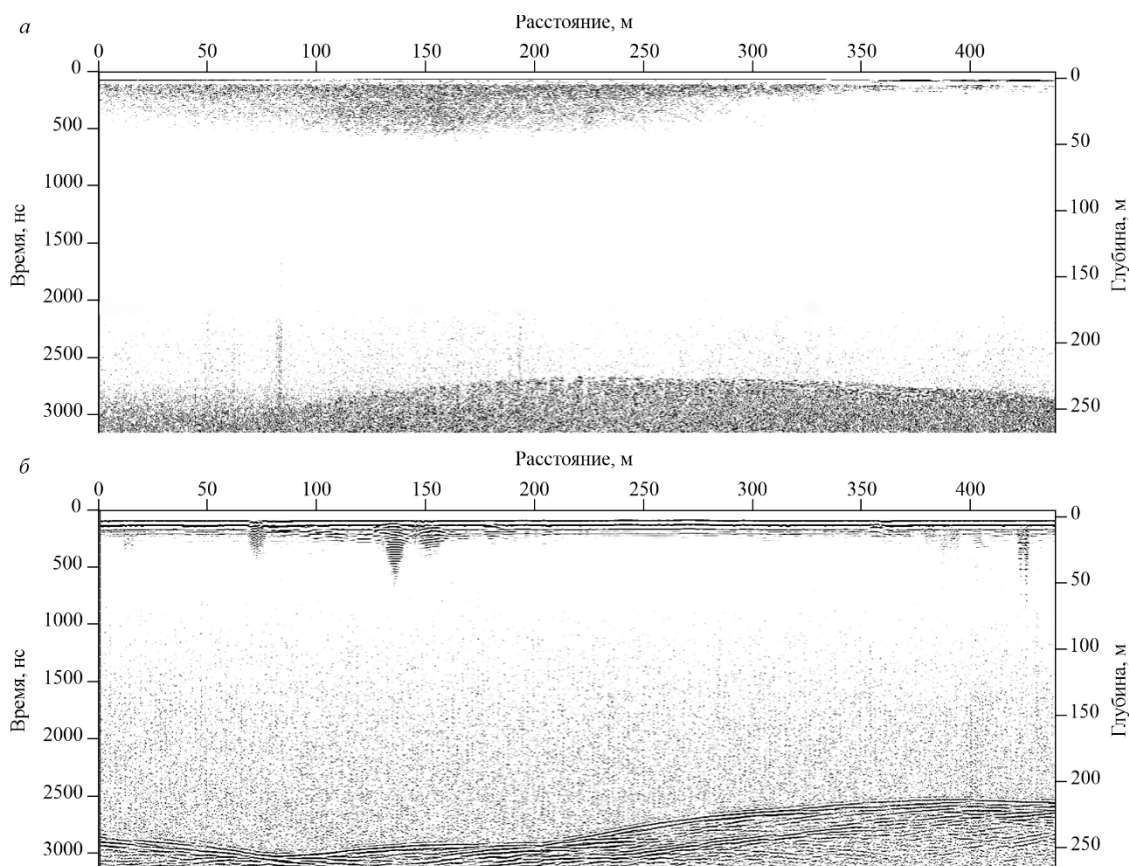


Рис.5. Радарограммы, полученные по параллельным маршрутам в 4 км к югу от южной границы оазиса Ширмахера: а – результат съемки георадаром ОКО-3, антенна 150 МГц, фрагмент профиля PR1; б – результат съемки георадаром Тритон-М, антенна 50 МГц, фрагмент профиля TR1



150 МГц в данном случае представляется слишком высокой по сравнению с частотой 25 МГц. Отражения от скалы на радарограммах, полученных с георадаром Тритон-М, остаются четкими, характеризуются высокой амплитудой и прекрасно трассируются на фоне шумов. К сожалению, глубже 260 м проследить отражение от скального основания не удалось, так как максимальная развертка Тритон-М составляет 3200 нс. На таких же временах записи и в аналогичных условиях радарограммы, полученные с ОКО-3, не демонстрируют столь четких отражений. Соотношение полезный сигнал/шум сильно уступает полученным с Тритон-М. Однако использование ОКО-3 может быть рекомендовано для случаев, когда развертки аппаратуры Тритон-М недостаточно. Так, максимальная глубина, на которой было зафиксировано отражение от скального основания с аппаратурой ОКО-3 АБ-150, составила 320 м (в 1,7 км к северу от посадочной площадки). Глубже сигнал полностью пропал на фоне шумов.

Результаты работ

Опытно-методические работы, нацеленные на выбор аппаратуры и оптимальных режимов съемки, показали, что для изучения внутреннего строения ледника предпочтительнее использовать георадар ОКО-3 с антенной 150 МГц, а для картирования рельефа горных пород под покровным ледником – георадар Тритон-М с антенной 25 МГц. Приведены первые практические результаты, полученные авторами с использованием выбранной аппаратуры и методики съемки, демонстрирующие особенности строения покровного ледника к югу от оазиса Ширмахера и положение кровли горных пород под ледниковым куполом в окрестностях оазиса.

Строение приповерхностной части покровного ледника вблизи посадочной площадки станции Новолазаревская. На территории 6 км² в масштабе 1:25000 была выполнена площадная георадарная съемка. Подробные результаты приведены в работе [26], где на основании георадарной и геодезических съемок проведена оценка безопасности действующей взлетно-посадочной полосы, дано описание внутренней структуры ледника, выявлены наиболее стабильные и динамично развивающиеся участки. В этой работе представлен лишь фрагмент съемки в 2 км к югу от посадочной площадки станции Новолазаревская (рис.6) для демонстрации возможностей георадара ОКО-3.

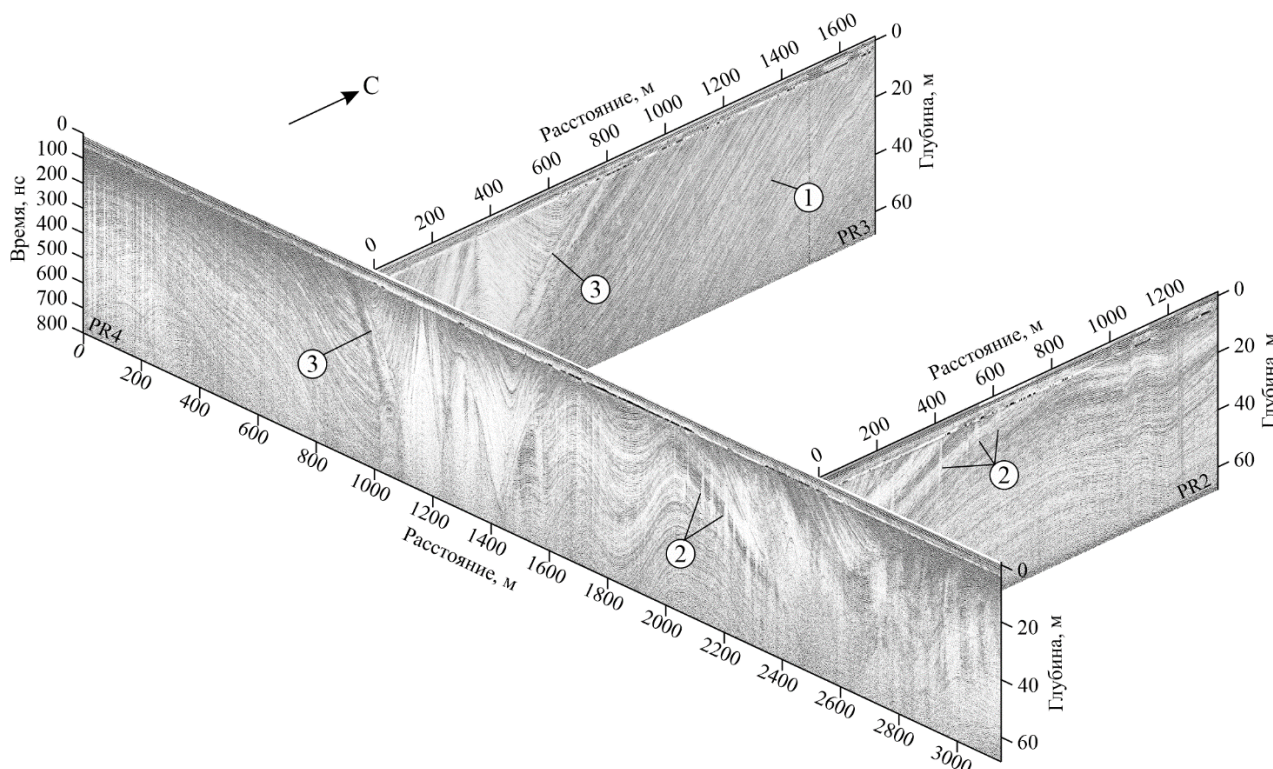


Рис.6. Внутреннее строение покровного ледника до глубины 70 м по данным георадиолокации к югу от посадочной площадки станции Новолазаревская

1 – субгоризонтальные ненарушенные толщи; 2 – трещины на своде антиклинальной складки; 3 – несогласный контакт



На профилях PR2 и PR3, имеющих меридиональное направление, в северной части ледник представлен субгоризонтальными или малыми углами наклона ненарушенными толщами. Именно там располагается взлетно-посадочная полоса. В южной части профилей ледник имеет более сложное строение. На профиле PR2 на своде антиклинальной складки отчетливо выделяются трещины, а на профиле PR3 прослеживается несогласно залегающая синклинальная складка наложенного льда. На профиле PR4 широтного простирания в центральной части наблюдается складчатая структура. При этом антиклинальные куполообразные складки, характеризующиеся локальными областями растяжения, сопровождаются достаточно большим количеством трещин. Синклинальные вогнутые складки, соответствующие зонам сжатия, не демонстрируют развитие трещин. Также на георадарном разрезе профиля PR4 можно проследить субвертикальный несогласный контакт между субгоризонтальной толщей в западной части и смятой в крутые складки в центральной и восточной частях профиля.

Формирования складчатых структур, по-видимому, связаны с неравномерным движением ледника, что подтверждено высокоточными геодезическими съемками [26], а также расчлененным рельефом подстилающего скального основания, о чем свидетельствует наличие горных выходов (нунатаков) в радиусе 4-7 км, склоны которых резко погружаются под ледник. Закартировать подледный рельеф именно на этом участке сейчас не удалось из-за ограниченной длины записи используемых георадаров. Дальнейшие работы по выяснению корреляции между внутренней структурой ледника и рельефом подстилающего скального основания представляются перспективными и интересными в научном и практическом плане.

Таким образом, площадная георадарная съемка с использованием георадара ОКО-3 дает возможность с высокой детальностью рассмотреть внутреннее строение ледника, получить его трехмерную модель и сделать предположения о истории его развития. Дополняя полученные георадарные разрезы результатами бурения, включая изотопный анализ керна, можно перейти к решению вопросов гляциостратиграфии. Опираясь на характерную волновую картину и четкие маркирующие горизонты, возможно выявлять георадарные фации, прослеживая в пространстве толщи определенных возрастов и условий образования по аналогии с сейсмостратиграфией.

В настоящий момент не существует методов, которые с такой же детальностью и до такой же глубины дают возможность изучить любую из геологических сред. Лишь уникальное сочетание физических свойств льда и возможностей георадиолокации позволяют «заглянуть» внутрь ледника и получить четкую картину его внутреннего строения.

Подледный рельеф вблизи оазиса Ширмахера. На радарограммах, полученных с аппаратурой Тритон-М, скальное основание прослеживается отчетливо, граница очень контрастная (рис.7). На рис.7, а представлен фрагмент профиля TR1 длиной 4500 м, проложенного от восточной оконечности оазиса в сторону посадочной площадки. К сожалению, реверберации от присутствия воды в руслах ручьев и приповерхностных внутриледниковых каналах частично зашумляют радарограммы, особенно вблизи оазиса и на склоне ледникового купола. Однако отражение от границы лед – скала является настолько контрастным даже на предельно возможных развертках, что реверберации не помешали выделению целевой границы. Вблизи оазиса скала прослеживается на глубине 20-40 м. Далее, по мере подъема на ледник, ближе к нулевым пикетам, граница отмечается на глубине более 250 м от дневной поверхности. К сожалению, глубже 260 м проследить отражение от скального основания не удалось, так как максимальная развертка Тритон-М составляет 3200 нс.

На профиле TR1 подледный рельеф достаточно пологий. Отдельные поднятия и впадины в высоту не превышают 30 м. Наблюдается небольшое понижение рельефа в юго-западном направлении. Все дополнительные маршруты, выполненные в направлении посадочной площадки, не принесли результата, так как скальное основание оказалась ниже предельно возможной глубины регистрации, что свидетельствует об отсутствии его резких подъемов. На перпендикулярном профиле TR3, выполненном в восточном направлении, наблюдается резкое понижение подледного основания. На отрезке длиной 200 м его кровля опускается с отметки –20 м до отметки –180 м. Георадарный маршрут, выполненный с разверткой 3200 нс в продолжение профиля TR3, продемонстрировал, что указанная граница продолжает опускаться под крутым углом и примерно через 100 м уходит за пределы окна записи, т.е. на глубину более 260 м.

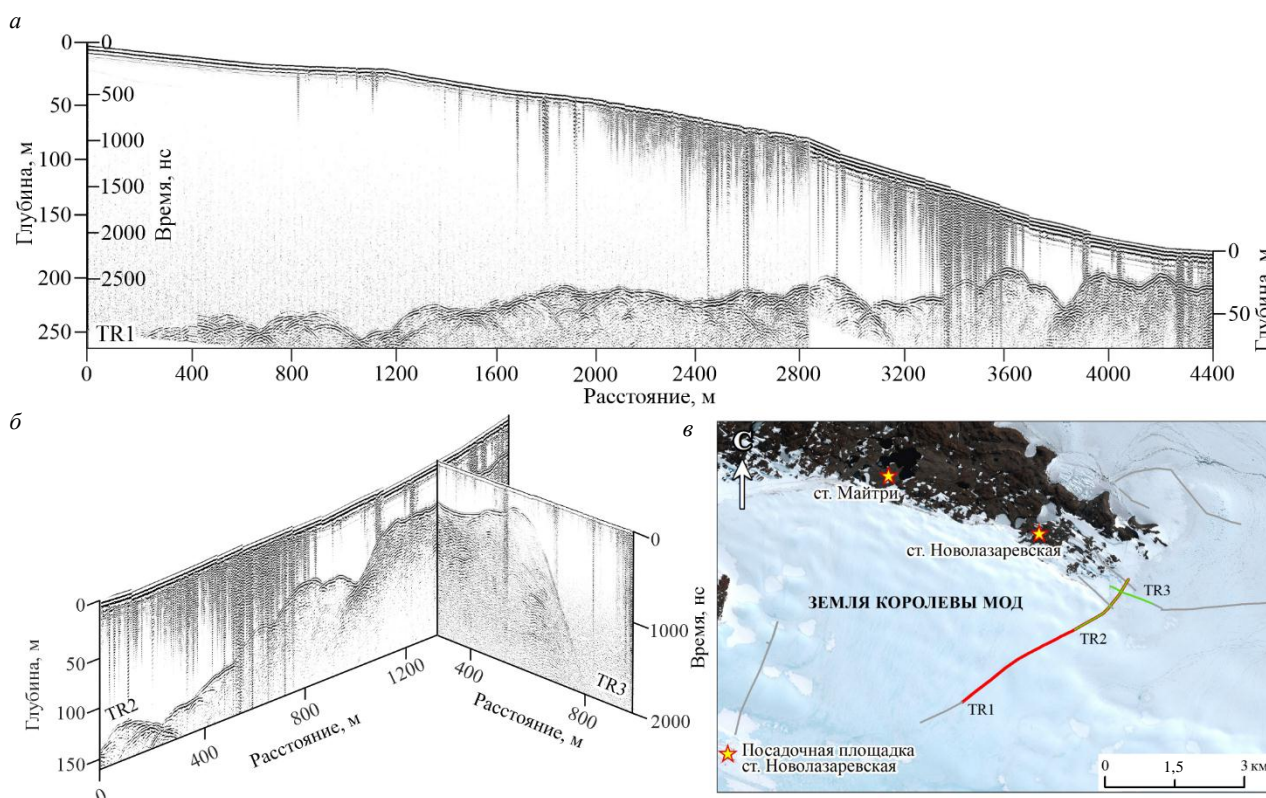


Рис.7. Подледный рельеф горных пород вблизи восточной оконечности оазиса Ширмахера:
а – вдоль трассы между станцией Новолазаревская и посадочной площадкой; б – на пересечении трассы и перпендикулярного профиля восточного простирания;
в – положение георадарных маршрутов, представленных на рис. а и б

Указанный профиль был продлен на 4,5 км к востоку от оазиса, чтобы проследить возможное повторное поднятие границы к дневной поверхности. Однако этого не произошло, и мощность ледника на всем протяжении оказалась больше 260 м. Аналогичная картина наблюдается на параллельном профиле, расположенном в 2,5 км к югу. Таким образом, вероятно, оазис Ширмахера с восточной стороны ограничен крутым сбросом.

Выводы

Выполненная георадарная съемка показала возможность использования обоих типов радаров как для изучения внутреннего строения ледника до глубины около 140 м, так и для картирования кровли подстилающего скального основания до глубин 250-300 м. Однако георадар ОКО-3 с антенной АБ-150 дает возможность более детально рассмотреть слоистость ледниковой толщи, нарушения ее сплошности и внутреннюю структуру ледника в целом. Георадар Тритон-М с использованием частоты 25 МГц в большей степени пригоден для изучения подледного рельефа. На максимально возможной развертке 3200 нс, что соответствует глубине 260 м, он демонстрирует четкие отражения от подстилающих горных пород. Таким образом, усовершенствованные, с большой длиной записи, средне- и низкочастотные георадары ОКО-3 с антенной 150 МГц и Тритон-М с раздвижной антенной 25-50-100 МГц характеризуются высокой разрешающей способностью и обеспечивают необходимую глубинность исследований. Они показали надежные результаты, удобны в эксплуатации в условиях полярных регионов и могут быть рекомендованы для изучения покровных ледников Антарктиды толщиной до 250 м и аналогичных объектов.

Авторы выражают благодарность начальнику Российской антарктической экспедиции П.И.Луневу за организацию полевых исследований и техническую поддержку, сотрудникам зимовочного состава станции Новолазаревская 69-й РАЭ А.Г.Мельникову и М.Г.Бачадину за помощь в проведении работ, а также ведущему геофизику ООО «ГеофизПоиск» Н.Е.Романовой за полезные обсуждения и техническую помощь.



ЛИТЕРАТУРА

1. Popov S. Fifty-five years of Russian radio-echo sounding investigations in Antarctica // *Annals of Glaciology*. 2020. Vol. 61. Iss. 81. P. 14-24. DOI: [10.1017/aog.2020.4](https://doi.org/10.1017/aog.2020.4)
2. Annan A.P. GPR Methods for Hydrogeological Studies // *Hydrogeophysics*. Springer, 2005. Vol. 50. P. 185-213. DOI: [10.1007/1-4020-3102-5_7](https://doi.org/10.1007/1-4020-3102-5_7)
3. Schroeder D.M., Bingham R.G., Blankenship D.D. et al. Five decades of radioglaciology // *Annals of Glaciology*. 2020. Vol. 61. Iss. 81. P. 1-13. DOI: [10.1017/aog.2020.11](https://doi.org/10.1017/aog.2020.11)
4. Taurisano A., Tronstad S., Brandt O., Kohler J. On the use of ground penetrating radar for detecting and reducing crevasse-hazard in Dronning Maud Land, Antarctica // *Cold Regions Science and Technology*. 2006. Vol. 45. Iss. 3. P. 166-177. DOI: [10.1016/j.coldregions.2006.03.005](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.03.005)
5. Tess X.H. Luo, Wallace W.L. Lai, Ray K.W. Chang, Goodman D. GPR imaging criteria // *Journal of Applied Geophysics*. 2019. Vol. 165. P. 37-48. DOI: [10.1016/j.jappgeo.2019.04.008](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.04.008)
6. Williams R.M., Ray L.E., Lever J.H., Burzynski A.M. Crevasse Detection in Ice Sheets Using Ground Penetrating Radar and Machine Learning // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2014. Vol. 7. Iss. 12. P. 4836-4848. DOI: [10.1109/JSTARS.2014.2332872](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2332872)
7. Pattyn F., Carter S.P., Thoma M. Advances in modelling subglacial lakes and their interaction with the Antarctic ice sheet // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2016. Vol. 374. Iss. 2059. № 20140296. DOI: [10.1098/rsta.2014.0296](https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0296)
8. Coustou L.-A., Siegert M. Dynamic flows create potentially habitable conditions in Antarctic subglacial lakes // *Science Advances*. 2021. Vol. 7. Iss. 8. № eabc3972. DOI: [10.1126/sciadv.abc3972](https://doi.org/10.1126/sciadv.abc3972)
9. Fürst J.J., Rybak O., Goelzer H. et al. Improved convergence and stability properties in a three-dimensional higher-order ice sheet model // *Geoscientific Model Development*. 2011. Vol. 4. Iss. 4. P. 1133-1149. DOI: [10.5194/gmd-4-1133-2011](https://doi.org/10.5194/gmd-4-1133-2011)
10. Johari G.P., Whalley E. The dielectric properties of ice Ih in the range 272-133 K // *The Journal of Chemical Physics*. 1981. Vol. 75. Iss. 3. P. 1333-1340. DOI: [10.1063/1.442139](https://doi.org/10.1063/1.442139)
11. Evans S. Radio techniques for the measurement of ice thickness // *Polar Record*. 1963. Vol. 11. Iss. 73. P. 406-410. DOI: [10.1017/S0032247400053523](https://doi.org/10.1017/S0032247400053523)
12. Frémand A.C., Fretwell P., Bodart J.A. et al. Antarctic Bedmap data: Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable (FAIR) sharing of 60 years of ice bed, surface, and thickness data // *Earth System Science Data*. 2023. Vol. 15. Iss. 7. P. 2695-2710. DOI: [10.5194/essd-15-2695-2023](https://doi.org/10.5194/essd-15-2695-2023)
13. Siegert M.J. A 60-year international history of Antarctic subglacial lake exploration // *Geological Society, London, Special Publications*. 2018. Vol. 461. P. 7-21. DOI: [10.1144/SP461.5](https://doi.org/10.1144/SP461.5)
14. Kapitsa A.P., Ridley J.K., Robin G. de Q. et al. A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica // *Nature*. 1996. Vol. 381. Iss. 6584. P. 684-686. DOI: [10.1038/381684a0](https://doi.org/10.1038/381684a0)
15. Livingstone S.J., Yan Li, Anja Rutishauser et al. Subglacial lakes and their changing role in a warming climate // *Nature Reviews Earth & Environment*. 2022. Vol. 3. Iss. 2. P. 106-124. DOI: [10.1038/s43017-021-00246-9](https://doi.org/10.1038/s43017-021-00246-9)
16. Siegert M.J., Ross N., Le Brocq A.M. Recent advances in understanding Antarctic subglacial lakes and hydrology // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2016. Vol. 374. Iss. 2059. № 20140306. DOI: [10.1098/rsta.2014.0306](https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0306)
17. Siegert M.J., Priscu J.C., Alekhina I.A. et al. Antarctic subglacial lake exploration: first results and future plans // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2016. Vol. 374. Iss. 2059. № 20140466. DOI: [10.1098/rsta.2014.0466](https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0466)
18. Попов С.В., Боронина А.С., Екайкин А.А. и др. Дистанционные исследования и математическое моделирование озера Восток, Восточная Антарктида: прошлое, настоящее и будущее // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024. Т. 70. № 4. С. 460-476 (in English). DOI: [10.30758/0555-2648-2024-70-4-460-476](https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-4-460-476)
19. Forte E., Bondini M.B., Bortoletto A. et al. Pros and Cons in Helicopter-Borne GPR Data Acquisition on Rugged Mountainous Areas: Critical Analysis and Practical Guidelines // *Pure and Applied Geophysics*. 2019. Vol. 176. Iss. 10. P. 4533-4554. DOI: [10.1007/s00024-019-02196-2](https://doi.org/10.1007/s00024-019-02196-2)
20. Campbell S., Affleck R.T., Sinclair S. Ground-penetrating radar studies of permafrost, periglacial, and near-surface geology at McMurdo Station, Antarctica // *Cold Regions Science and Technology*. 2018. Vol. 148. P. 38-49. DOI: [10.1016/j.coldregions.2017.12.008](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.12.008)
21. Попов С.В., Поляков С.П., Пряхин С.С. и др. 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. DOI: [10.21782/KZ1560-7496-2017-1\(73-84\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-1(73-84))
22. Boronina A., Popov S., Pryakhina G. et al. Formation of a large ice depression on Dalk Glacier (Larsemann Hills, East Antarctica) caused by the rapid drainage of an englacial cavity // *Journal of Glaciology*. 2021. Vol. 67. Iss. 266. P. 1121-1136. DOI: [10.1017/jog.2021.58](https://doi.org/10.1017/jog.2021.58)
23. Григорьева С.Д., Киньябаева Э.Р., Кузнецова М.Р. Программа комплексного мониторинга опасных природных объектов района станции Прогресс: основные результаты работ 2017-2021 годов // *Российские полярные исследования*. 2021. № 3. С. 13-15.
24. Lili Cheng, Ji Lu, Cheng Zhou. Non-destructive compaction quality evaluation of runway construction based on GPR data // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2024. Vol. 39. Iss. 6. P. 1379-1406. DOI: [10.1080/10589759.2023.2255363](https://doi.org/10.1080/10589759.2023.2255363)
25. Nansha Li, Renbiao Wu, Haifeng Li et al. MV-GPRNet: Multi-View Subsurface Defect Detection Network for Airport Runway Inspection Based on GPR // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Iss. 18. № 4472. DOI: [10.3390/rs14184472](https://doi.org/10.3390/rs14184472)
26. Боронина А.С., Кашкевич М.П., Попов С.В. и др. Новые данные о строении и движении ледника в районе посадочной площадки станции Новолазаревская (Восточная Антарктида) // *Лед и Снег*. 2024. Т. 64. № 3. С. 387-402. DOI: [10.31857/S2076673424030065](https://doi.org/10.31857/S2076673424030065)
27. Campbell S., Affleck R.T., Sinclair S. Ground-penetrating radar studies of permafrost, periglacial, and near-surface geology at McMurdo Station, Antarctica // *Cold Regions Science and Technology*. 2018. Vol. 148. P. 38-49. DOI: [10.1016/j.coldregions.2017.12.008](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.12.008)
28. Forte E., French H.M., Raffi R. et al. Investigations of polygonal patterned ground in continuous Antarctic permafrost by means of ground penetrating radar and electrical resistivity tomography: Some unexpected correlations // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2022. Vol. 33. Iss. 3. P. 226-240. DOI: [10.1002/ppp.2156](https://doi.org/10.1002/ppp.2156)
29. Jingxue Guo, Lin Li, Juncheng Liu et al. Ground-penetrating radar survey of subsurface features at the margin of ice sheet, East Antarctica // *Journal of Applied Geophysics*. 2022. Vol. 206. № 104816. DOI: [10.1016/j.jappgeo.2022.104816](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104816)



30. *Dunmire D., Lenaerts J.T.M., Banwell A.F. et al.* Observations of Buried Lake Drainage on the Antarctic Ice Sheet // *Geophysical Research Letters*. 2020. Vol. 47. Iss. 15. № e2020GL087970. DOI: [10.1029/2020GL087970](https://doi.org/10.1029/2020GL087970)
31. *Dugan H.A., Doran P.T., Tulaczyk S. et al.* Subsurface imaging reveals a confined aquifer beneath an ice-sealed Antarctic lake // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42. Iss. 1. P. 96-103. DOI: [10.1002/2014GL062431](https://doi.org/10.1002/2014GL062431)
32. *Swain A.K., Goswami S.* Continuous GPR survey using Multiple Low Frequency antennas – case studies from Schirmacher Oasis, East Antarctica // *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. 2014. Vol. 7. № 4. P. 1623-1629.
33. *Grigoreva S.D., Kuznetsova M.R., Kiniabaeva E.R.* New data on Progress Lake (Larsemann Hills, East Antarctica): Recently discovered subglacial part of the basin // *Polar Science*. 2023. Vol. 38. № 100925. DOI: [10.1016/j.polar.2023.100925](https://doi.org/10.1016/j.polar.2023.100925)
34. *Saks T., Rinterknecht V., Lavrentiev I. et al.* Acceleration of Abramov Glacier (Pamir-Alay) retreat since the Little Ice Age // *Boreas*. 2024. Vol. 53. Iss. 3. P. 415-429. DOI: [10.1111/bor.12659](https://doi.org/10.1111/bor.12659)
35. *Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A. et al.* Volume Changes of Elbrus Glaciers From 1997 to 2017 // *Frontiers in Earth Science*. 2019. Vol. 7. № 153. DOI: [10.3389/feart.2019.00153](https://doi.org/10.3389/feart.2019.00153)
36. *Борисик А.Л., Новиков А.Л., Глазовский А.Ф. и др.* Строение и динамика ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) по данным повторных георадиолокационных исследований 1999, 2018 и 2019 годов // *Лед и Снег*. 2021. Т. 61. № 1. С. 26-37. DOI: [10.31857/S2076673421010069](https://doi.org/10.31857/S2076673421010069)
37. *Борисик А.Л., Демидов В.Э., Ромашова К.В., Новиков А.Л.* Внутренняя дренажная сеть и характеристики подледникового стока ледника Альдегонда (о. Западный Шпицберген) // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2021. Т. 67. № 1. С. 67-88. DOI: [10.30758/0555-2648-2021-67-1-67-88](https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-67-88)
38. *Terekhov A.V., Verkulich S., Borisik A. et al.* Mass balance, ice volume, and flow velocity of the Vestre Grønfjordbreen (Svalbard) from 2013/14 to 2019/20 // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2022. Vol. 54. Iss. 1. P. 584-602. DOI: [10.1080/15230430.2022.2150122](https://doi.org/10.1080/15230430.2022.2150122)
39. *Nielsen L., Bendixen M., Kroon A. et al.* Sea-level proxies in Holocene raised beach ridge deposits (Greenland) revealed by ground-penetrating radar // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. № 46460. DOI: [10.1038/srep46460](https://doi.org/10.1038/srep46460)
40. *Lamsters K., Karušs J., Krievāns M., Ješkins J.* High-Resolution surface and BED topography mapping of Russell Glacier (SW Greenland) using UAV and GPR // *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: XXIV ISPRS Congress, Commission II, 31 August – 2 September 2020, Nice, France*. 2020. Vol. V-2-2020. P. 757-763. DOI: [10.5194/isprs-annals-V-2-2020-757-2020](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2020-757-2020)
41. *Wilken D., Wunderlich T., Zori D. et al.* Integrated GPR and archaeological investigations reveal internal structure of man-made Skipphóll mound in Leiruvogur, Iceland // *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2016. Vol. 9. P. 64-72. DOI: [10.1016/j.jasrep.2016.07.005](https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.07.005)
42. *Harrison D., Ross N., Russell A.J., Jones S.J.* Ground-penetrating radar (GPR) investigations of a large-scale buried ice-marginal landsystem, Skeiðarársandur, SE Iceland // *Boreas*. 2022. Vol. 51. Iss. 4. P. 824-846. DOI: [10.1111/bor.12587](https://doi.org/10.1111/bor.12587)
43. *Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я.* Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований. М.: ГЕОС, 2014. 528 с.
44. *Galley R.J., Trachtenberg M., Langlois A. et al.* Observations of geophysical and dielectric properties and ground penetrating radar signatures for discrimination of snow, sea ice and freshwater ice thickness // *Cold Regions Science and Technology*. 2009. Vol. 57. Iss. 1. P. 29-38. DOI: [10.1016/j.coldregions.2009.01.003](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.01.003)

Авторы: **Марина Петровна Кашкевич**, канд. геол.-минерал. наук, доцент, m.kashkevich@spbu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3600-5570> (Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия), **Алина Сергеевна Боронина**, старший преподаватель, <https://orcid.org/0000-0002-3486-5243> (Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия), **Евгений Максимович Михайлов**, техник-геофизик, <https://orcid.org/0009-0006-9841-4886> (Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского, Санкт-Петербург, Россия), **Сергей Викторович Попов**, д-р геол.-минерал. наук, ведущий инженер, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-1830-8658> (ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия; Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.