

Санкт-Петербургский Государственный Университет

Институт наук о Земле

БАНАДЫСЕВА Мария Дмитриевна

Выпускная квалификационная работа

**Георадиолокация для изучения потенциально прорывоопасных озёр
каскада Ледяное-Южное-Станционное вблизи станции Новолазаревская,
Восточная Антарктида**

Уровень образования: бакалавриат

Направление *05.03.01 «Геология»*

Основная образовательная программа *СВ.5018 «Геология»*

Научный руководитель:

доцент кафедры геофизики

к.г.-м.н. Кашкевич М.П.

Рецензент:

Младший научный сотрудник

Арктический и антарктический

научно-исследовательский институт

Борисик А.Л.

Санкт-Петербург

2023

Содержание

Введение	3
1. Основы метода георадиолокации	5
2. Физико-географическая характеристика района исследований	11
3. Геофизическая изученность района	14
4. Методика проведения полевых работ	16
5. Методика обработки данных	21
6. Результаты	27
Заключение	35
Список литературы	37

Введение

Для геологического сообщества изучение Антарктиды интересно не только с точки зрения реконструкции геологической эволюции (Lee, 2022; Fitzgerald, 2022; Raхman, 2019) и геологического строения континента (Лазарев, 1964; Поздеев, 1987; Leitchenkov, 2016), но и с точки зрения потенциальной минерально-сырьевой базы, которая не принадлежит ни одному государству Земли. По существующим априорным оценкам масштабы ресурсов Антарктиды весьма значительны, особенно по таким полезным ископаемым, как: алмазы, уран, редкие металлы и углеводороды (Шнюков, 2013; Wright, 1974). Мощный ледяной щит является хранилищем огромных запасов пресной воды, которая также является ценным ресурсом.

Любые исследования на южном полюсе требуют обеспечения безопасности жизнедеятельности научного состава. Исследования включают в себя мониторинг трещин, полостей и подлёдных озёр, инженерные изыскания для расположения различных объектов, а также изучение каскадов озёр и явления прорывов и сброса воды в таких каскадах. Выявление и локализация трещин в приповерхностной части ледового покрова играет важную роль в обеспечении безопасности антарктических экспедиций, поэтому необходимо своевременное выявление таких объектов на начальной стадии и отслеживание развития уже имеющихся трещин (Попов, 2015; 2020). Инженерные изыскания проводятся для организации взлётно-посадочных полос (ВПП), участков для хранения топлива или для строительства жилых модулей станции. Также необходим мониторинг состояния приповерхностной части ледового покрова вблизи этих объектов (Попов, 2022; 2016; Киньябаева, 2020).

Большая часть станций располагается на антарктических оазисах — свободных ото льда частях континента. В таких местах располагаются озёра, особенностью которых являются формирования прорывных паводков в периоды максимального таяния ледников и снежников — источников питания озёр (Пряхина, 2020). Подлёдные озёра, испытывающие тенденции к резкой разгрузке водных масс изучаются уже продолжительное время. Интерес обусловлен тем, что в ряде случаев прорыв озера ведёт к разрушению существующей инфраструктуры. Например, в 2017 году прорыв на леднике Долк привел к образованию обширной депрессии. В результате образования структуры была разрушена часть трассы, соединяющей станции Прогресс (РФ) и Зонгшан (КНР) с

пунктом формирования санно-гусеничных походов во внутренние районы континента, а также с аэродромом (Попов, 2018; Григорьева, 2021).

В 2021 году было выполнено георадарное профилирование на посадочной площадке станции Новолазаревская, озёрах и ледниках оазиса Ширмахера, а также на участке трассы следования санно-гусеничного похода. На глубинном разрезе по дороге были обнаружены дифрагированные волны в однородной толще. Это стало основной причиной начала изучения данного каскада. Одной из задач этих исследований является изучение строения каскада озёр, которые имеют тенденцию к прорыву.

Актуальность работы связана с тем, что явление прорывных озёр является катастрофическим явлением и достаточное близкое расположение такого объекта к станции может быть опасным (Григорьева, 2021; Боронина, 2022). Кроме того, по одному из гротов проходит дорога и её разрушение нежелательно. Таким образом, составление комплекта схем и модели поможет в изучении объекта и самого явления. В дальнейшем это будет одной из составляющих для моделирования прорыва гротов и размыва дороги. В рамках исследования были сформулирована цель и обозначены задачи:

Цель: Создание модели каскада прорывоопасных озёр Ледяное-Южное- Станционное на основе данных георадиолокации

Задачи:

- 1) Обработка полевых георадарных данных: получение скоростных характеристик, учет топографии, построение глубинных разрезов, оцифровка границ;
- 2) Построение комплекта схем изолиний мощностей снега, льда, воды, рельефа скального основания;
- 3) Подготовка гридов для построения двумерной модели каскада озёр Ледяное-Южное-Станционное и основы для объемной модели снежно-ледовой перемычки между озерами Южное и Станционное.

1. Основы метода георадиолокации

Принцип действия аппаратуры подповерхностного радиолокационного профилирования (георадара) основан на излучении сверхширокополосных импульсов метрового и дециметрового диапазона электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела толщ или объектов среды, имеющих различные электрофизические свойства (Владов, 2004). В качестве примера можно привести контакт талых и мёрзлых грунтов, пород разного литологического состава или наличие в приповерхностном разрезе инженерных или археологических сооружений (Владов, 2017).

Генерирующая антенна создает короткий электромагнитный импульс $f_0(t)$, а принимающая антенна принимает отклик. Анализируя время распространения импульса в леднике, фазовые и амплитудные характеристики отраженного сигнала, можно определить толщину ледника и глубину залегания отражающих границ (Богородский, 1983). В георадиолокации используются частоты в диапазоне 50–3000 МГц. Работа с таким диапазоном объясняется тем, что на этом интервале вещественная часть диэлектрической проницаемости принимает относительно постоянные значения при разных частотах и температурах (рис.1) (Malmberg, 1956).

Глубинность исследований на самых низких частотах на ледниках может достигать нескольких сотен метров. При увеличении частоты глубинность снижается, однако повышается разрешающая способность. Таким образом, более низкие частоты дают общее глубинное описание среды, а высокие более подробное описание приповерхностных толщ.

Параметр, определяющий кинематику полей в методе георадара — это скорость распространения волны (Daniels, 2004):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'}},$$

где v — скорость волны в среде, c — скорость света, ε' — действительная часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости среды;

Контраст значений ε в слоях определяет отражательную способность границ между средами и в комплексе с линейными размерами поверхности локальных объектов, определяет способность этих самых объектов к образованию дифрагированных волн. В приповерхностной части разреза эффективная диэлектрическая проницаемость трёх-

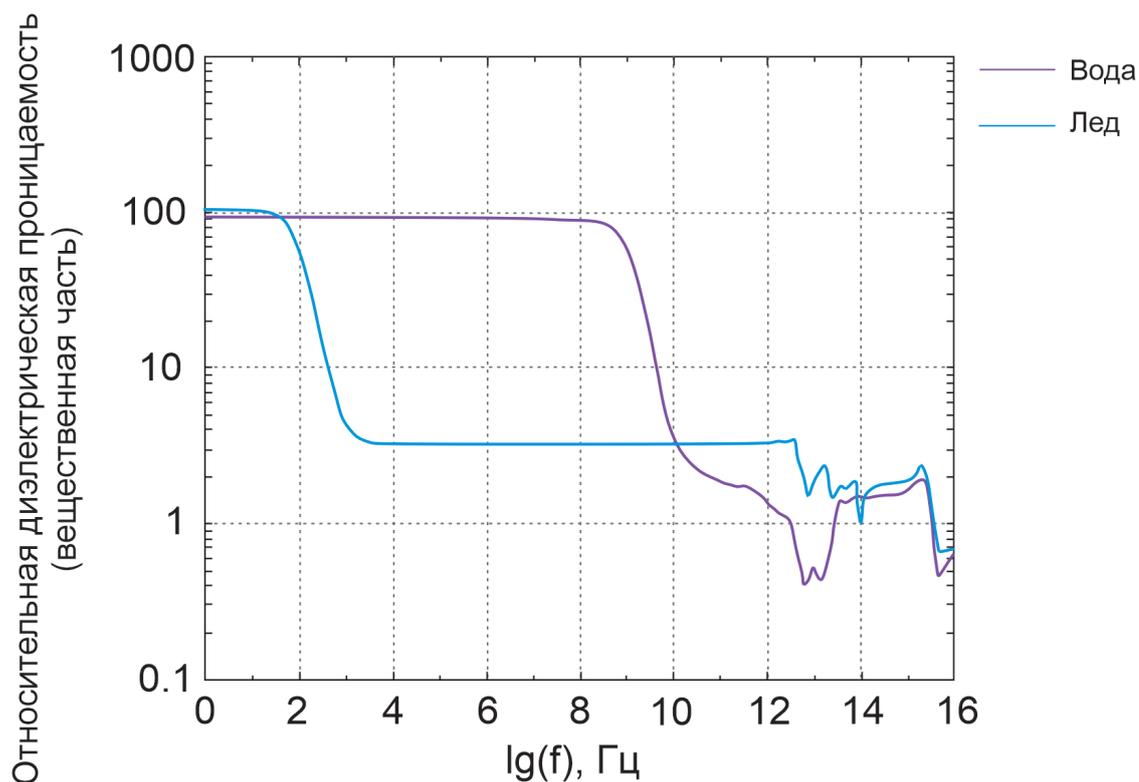


Рис. 1: Зависимость вещественной части относительной диэлектрической проницаемости воды и льда от частоты электромагнитных волн.

компонентной среды (воздух, вода, минеральный скелет) определяется соотношением этих компонент между собой.

Таким образом, на значение ε влияют структурно-текстурные особенности породы, степень обводнённости, степень нарушенности, пористость, минеральный состав и другие природные или технические причины (Владов, 2004).

Ключевыми параметрами, которые определяют возможности применения метода георадиолокации в различных средах, являются удельное затухание и скорость распространения волн в среде, которая, в свою очередь, зависит от электрофизических свойств этой самой среды. Практически все вещества, кроме чистого металла, могут быть отнесены к классу диэлектриков с конечной проводимостью. В связи с этим вводится комплексная относительная (относительно вакуума, где диэлектрическая проницаемость равна ε_0) диэлектрическая проницаемость (Blindow, 2009):

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'',$$

Таблица 1: Вещественная и мнимая относительная диэлектрическая проницаемость для основных компонентов разреза. (Malmberg, 1956; Zheng, 2005)

Среда	Вещественная часть	Мнимая часть
Воздух (20°C)	1.006	$4 \cdot 10^{-3}$
Лёд (-40°C)	3.17	$7.22 \cdot 10^{-3}$
Лёд (0°C)	3.18	$2.03 \cdot 10^{-2}$
Скальный фундамент	9	$8.20 \cdot 10^{-2}$
Вода (0°C)	85	2
Вода(15°C)	81	4

где ε – комплексная диэлектрическая проницаемость, ε'' – мнимая часть, связанная с конечной проводимостью диэлектрика, См/м:

$$\sigma = \omega \varepsilon'' \varepsilon_0,$$

где ω — круговая частота.

Диэлектрические потери характеризуются тангенсом угла — отношением мнимой и вещественной частей относительной диэлектрической проницаемости:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon'' \varepsilon_0}.$$

На самом деле, зависимость комплексной диэлектрической проницаемости от частоты даже для однородного диэлектрика в большой степени определяется временем поляризации τ . Поляризация диэлектриков делится на упругую и релаксационную. Упругая поляризация заключается в смещении упруго связанных зарядов под действием приложенного электромагнитного поля. Время установления такой поляризации лежит в пределах $10^{-12} - 10^{-15}$ с в зависимости от того, что меняет свое положение: электроны, атомы или полярные молекулы.

Релаксационная (тепловая) поляризация характерна для диэлектриков, содержащих слабо связанные частицы, способные менять положение равновесия при тепловом движении. Под действием приложенного напряжения в тепловом движении появляется упорядоченность. Время установления такой поляризации лежит в пределах $10^{-2} - 10^{-11}$ с. Так, например, для воды время поляризации составляет 10^{-11} с и ее диэлек-

трическая проницаемость не меняется до частот порядка 10^{10} Гц. Для льда $\tau \approx 10^{-5}$ с и для частот выше 10^{-8} Гц диэлектрическая проницаемость практически не зависит от частоты.

Таким образом, основным признаком для расчленения толщи искусственных или естественных слоев является их контраст по диэлектрической проницаемости. Для решения инженерных задач необходимо установить связи между диэлектрической проницаемостью и требуемыми характеристиками вещества — влагонасыщенностью, литологией, агрегатным состоянием и т.д., что может быть сделано в каждом конкретном случае с помощью параметрических наблюдений, скважин, лабораторных измерений и т.п.;

Распространение электромагнитных волн метрового диапазона, характерного для георадарных исследований, рассматривается в рамках законов геометрической оптики соответственно для плоских волн на больших удалениях от источника и для сферических волн на малых удалениях от источника. Предполагается, что в рамках допустимых погрешностей в определении скоростей распространения и амплитуд волн действуют принципы Ферма, Гюйгенса, Френеля и закон Снеллиуса. Предполагается, что в изотропной среде луч перпендикулярен фронту волны и возможны геометрические построения путей волн в среде с последующим вычислением параметров среды по измеренным кинематическим и динамическим характеристикам записей волн (радарограмм) практически так же, как это делается в сейсморазведке.

Коэффициент отражения Френеля (R) при нормальном падении волны на границу двух слоёв 1 и 2 с различной диэлектрической проницаемостью будет: ε' .

$$R = (\sqrt{\varepsilon'_1} - \sqrt{\varepsilon'_2}) / (\sqrt{\varepsilon'_1} + \sqrt{\varepsilon'_2})$$

Также стоит отметить, что поверхности могут состоять из хаотически расположенных неровностей — поверхность негладкая. Это может быть поверхность несогласия, в которой помимо самого неровного контакта могут присутствовать также различные включения: тиллиты или гальки. Кроме того, поверхность ложа ледника подвергается эродированию со стороны ледника. В таком случае отражение будет рассеянным (диффузным). Природные поверхности не являются полностью гладкими или полностью шероховатыми, поэтому отражение волн имеет полурассеянный характер, максимум

будет приходиться на направление зеркального отражения.

Коэффициент преломления (прохождения через границу) будет равен:

$$K_{\text{ПР}} = 1 - R = 2\sqrt{\varepsilon'_2}/(\sqrt{\varepsilon'_1} + \sqrt{\varepsilon'_2})$$

При двукратном прохождении через границу, например, при отражении от более глубокой границы, суммарное уменьшение амплитуды сигнала будет равно $1 - K_{\text{ОТР}}^2$.

Дифракция возникает в том случае, когда электромагнитными волнами облучается отражающий объект, размеры которого меньше преобладающей длины волны. Суть явления состоит в том, что в соответствии с принципом Гюйгенса, каждая точка фронта волны представляет собой элементарный вторичный источник волн. На небольшой в сравнении с длиной волны поверхности объекта эти элементарные источники складываются. В итоге весь объект представляет собой вторичный источник электромагнитных волн в среде. Это чрезвычайно важное для георадиолокационных исследований явление, так как поиск локальных объектов сводится к поиску вторичных источников излучения на записях волновых картин, что позволяет не только опознать их на записи, но и определить глубину залегания объекта и скорость распространения электромагнитных волн в среде над объектом.

Под затуханием чаще всего понимают общее уменьшение амплитуды зондирующего сигнала при прохождении его через среду до отражающей границы и обратно к приемнику. Измеряется этот параметр в Дб/м.

Таблица 2: Мнимая относительная диэлектрическая проницаемость и удельное затухание для основных компонентов разреза (Zheng, 2005; Мачерет, 2006)

Среда	Мнимая часть	Удельное затухание, Дб/м
Воздух (20°C)	$4 \cdot 10^{-3}$	0
Лёд (-40°C)	$7.22 \cdot 10^{-3}$	0.042
Лёд (0°C)	$2.03 \cdot 10^{-2}$	0.055
Скальный фундамент	$8.20 \cdot 10^{-2}$	
Вода (0°C)	2	7.14
Вода(15°C)	4	10

Факторами, вызывающие уменьшение амплитуды: отражение и преломление на про-

межуточных границах, потери, связанные с проводимостью среды.

Все задачи, решаемые с помощью георадиолокации, могут быть разделены на несколько групп с характерными для каждой методиками исследований, способами обработки, типами отображения объектов исследования в поле электромагнитных волн и представлениями результата: инженерные (строительство), обеспечение безопасности (мониторинг автомобильных и железных дорог), геологические (палеорекострукции) и гляциологические (Владов, 2017; Daniels, 2004).

2. Физико-географическая характеристика района исследований

Каскад озёр располагается вблизи станции Новолазаревская, которая расположена в юго-восточной части оазиса Ширмахера на Побережье Земли Королевы Мод (рис.2). Координаты станции S 70° 46' E 11° 52'. На станции проводятся метеорологические, геофизические, гляциологические и океанологические исследования. В пяти километрах располагается индийская зимовочная станция Майтри, образованная в 1988 г. К северу от станции располагается шельфовый ледник со слабо волнистой поверхностью, оканчивающийся Ленинградским куполом. С южной стороны подходит склон материка. В 7 км к югу от станции, на леднике 550 м над уровнем моря, располагается аэродром, обслуживаемый компанией Antarctica Logistics Centre International (ALCI). Принимает аэродром тяжёлые самолёты Ил-76.



Рис. 2: Схема расположения станций на восточном побережье Антарктиды [www.aari.ru].

Оазис Ширмахера представляет собой свободный ото льда участок площадью около 35 км². Располагается в прибрежной части Восточной Антарктиды. Рельеф представлен небольшими поднятиями около 200 м, разделёнными долинами, вытянутыми в субширотном направлении. Море Лазарева располагается примерно в 80 км. На территории оазиса распространены ледниковые формы рельефа: ледниковые штриховки, «бараньи

лбы», трогии. Территория оазиса испытала по крайней мере три фазы оледенения, и следы покровного оледенения распространены по всей площади оазиса. Фундамент представлен толщами кислых гнейсов и кристаллических сланцев докембрийского возраста с прорвавшими их небольшими интрузиями габбро-норитов и габбро-диоритов с многочисленными жилами пегматитов. Фундамент претерпел метаморфизм гранулитовой и амфиболитовой фаций. Осадочные породы представлены мало, мощность не превышает 12–15 м и в основном песчано-алевритовыми рыхлыми отложениями с примесью глин. Породы претерпели низкую степень химического выветривания (Srivastava, 2013; Sengupta, 1986, 1988).

Климат оазиса формируется в низких температурах, с преобладанием континентальных признаков. Основную роль в формировании погоды играют температура и облачность, которые зависят от типа ветров. Это могут быть циклонические, либо стоковые ветра. Наиболее частым атмосферным явлением считаются метели. Они крайне редки летом и сравнительно часты весной. Также на климат влияет интенсивность солнечного излучения: большая часть поверхности не покрывается снегом в течение всего года. Зима на территории оазиса Ширмахера продолжается с апреля по сентябрь, лето продолжается с декабря по январь. Зимнее время характерно повышенным атмосферным давлением, пониженной влажностью воздуха, для лета характерны повышенные показатели давления, влажности и температуры, осадки незначительны. В среднем за год выпадает около 300 мм осадков. Среднегодовая температура воздуха в районе станции -11°C , минимальная -41°C , максимальная $+9.9^{\circ}\text{C}$. Животная часть оазиса представлена редкими гнездовьями снежного буревестника и южнополярного поморника.

На территории оазиса известно до 180 пресноводных озёр, большинство из них имеет ледниковое происхождение. Формированию котловин способствовала эрозионная деятельность ледника (Боронина, 2022). По степени минерализации озёра варьируются от пресноводных до солоноватых, в зависимости от удалённости от побережья. Наименее минерализованы озёра южной части оазиса, наиболее — северной (Sanjal, 2013). Самым глубоким из изученных озёр является озеро Глубокое (ок. 34 м), расположенное рядом со станцией Новолазаревская. К наиболее изученным относятся Диатомовое, Круглое и Зуб. Также на территории распространены временные водотоки, имеющие сезонный характер и наследованные русла. Доминирующее положение занимают водоёмы с перемежающимся стоком или бессточные. Первые относятся к прорывоопасным,

поскольку при интенсивном таянии льда и снега они дают большой сток. Объем таких озёр зависит от различных метеорологических условий и может меняться за короткое время весьма интенсивно. Большую часть года водоёмы закрыты льдом и лишь часть вскрывается в летний период, некоторые неглубокие озёра или небольшие по мощности водяной толщине водоёмы имеют тенденцию к полному промерзанию.

3. Геофизическая изученность района

Оазис был открыт в 1939 году немецкой экспедицией А. Ричера в процессе исследования Новой Швабии. Лётчики Люфтваффе проделали огромную работу по съёмке местности, поэтому данный район был назван в честь участника экспедиции — пилота Р. Ширмахера. В марте 1959 года, спустя 20 лет Советский союз установил на шельфовом льду исследовательскую станцию «Лазарев». Позже станция была переустановлена в оазис и получила название «Новолазаревская». Уже в 1961 году произошло переполнение озера, находящегося южнее и выше, чем территория станции, и возникла угроза затопления площадки будущей станции. Было решено сделать канал в снежнике для отвода потока воды в озеро, находившееся ниже строительной площадки.

С 60-х по 70-е годы были проведены масштабные рекогносцировочные работы. Это были геологические наблюдения на разрозненных участках, где обнажался докембрийский щит Восточной Антарктиды. Итогами этих работ являлись теория об эволюции кристаллического фундамента и осадочного чехла Антарктиды, а также о тождестве южного континента с другими гондванскими платформами Южного полушария; также было опубликовано более 100 научных работ и подготовлены геологические карты для «Атласа Антарктики», изданного в 1966 году (Каминский, 2008). Помимо геологических, гляциологических и геомагнитных работ проводились наблюдения за полярными сияниями, земными токами, а также сейсмические исследования, тогда же начались первые опытно-методические работы методом георадиолокации в Антарктиде.

С 70-х по 80-е годы основным направлением исследования являлась оценка ресурсного потенциала Антарктиды. Благодаря комплексу наземных, морских и аэрогеофизических исследований были получены данные о строении пассивной континентальной окраины, строении внутриконтинентальных районов Антарктиды, закрытых ледовой толщей. Также результаты исследований внесли вклад в решение фундаментальных вопросов, связанных с распадом Гондваны, тектоническим строением материка и миграционным районированием Антарктиды.

С 90-х годов по настоящее время возросла роль фундаментальных научных исследований региона. В конце XX века имели место более подробный анализ ранее собранных материалов и новые выводы о геодинамической истории континента, изотопно-геохимическое исследование имеющихся коллекций и уточнение обстановок формиро-

вания и времён происхождения ключевых событий. Специалисты института Альфреда Вегенера (Германия) в периоды с 1994 по 1999 года провели значительные по объёму аэрогеофизические работы. С помощью ледового локатора с частотой 150 МГц была отснята площадь около 1 млн км². В результате было изучено строение ледника, подлёдного рельефа, накоплена информация о мощности ледового покрова. На данный момент исследования решают задачи не картирования, а более детального изучения континента и ледника. Используются изотопный метод датирования, геофизические методы, изучают динамику ледниковых масс и различные явления, связанные с движением ледников. Также проводятся инженерные изыскания для мониторинга состояния прилежащих к станциям территорий и инфраструктуры. Одним из масштабных проектов можно назвать проект Antarctica's Gamburtsev Province Project (AGAP), направленный на изучение подледниковой системы — гор Гамбурцева.

4. Методика проведения полевых работ

Работы в оазисе Ширмахера начались с георадарной съёмки на озере Топографов и перемычки между озёрами. Исследования на озере Топографов обусловлены необходимостью локализации и оценки состояния тягача, провалившегося под лёд в феврале 2021 г. Кроме того необходимо было выяснить особенности его расположения на дне озера для установления возможности его гипотетического подъёма. Исследования перемычки между озёрами Южное и Станционное связаны с обеспечением безопасности транспортных операций РАЭ, поскольку по снежному мосту по ней проходит трасса, соединяющая станцию и посадочную площадку станции Новолазаревская (рис.3). По ходу обработки материалов в толще, подпруживающей озеро Южное, были обнаружены дифракции, связанные, вероятно, с местом стока воды (рис.4)



Рис. 3: Фотография дороги, соединяющей станцию и аэродром. Пунктиром обозначается место, где на радарограммах были обнаружены дифракции.

Далее работы в оазисе представляли собой георадарную съёмку изучаемых озёр и снежно-ледовых перемычек, шнековое бурение для заверки геофизических данных и тахеометрическую съёмку (рис. 5). Также были проведены работы георадаром по методике общей глубинной точки (ОГТ) для определения кинематических характеристик ледника. Съёмка была проведена по всему каскаду озёр Ледяное-Южное-Станционное. Съёмка на участке выполнялась георадаром ОКО-2 (ООО «Логистические системы», Россия) с экранированными антеннами АБ-150 и АБ-400 с частотами 150 МГц и 400 МГц соответственно (рис. 6). Выбор аппаратуры был обусловлен предварительными опытно-

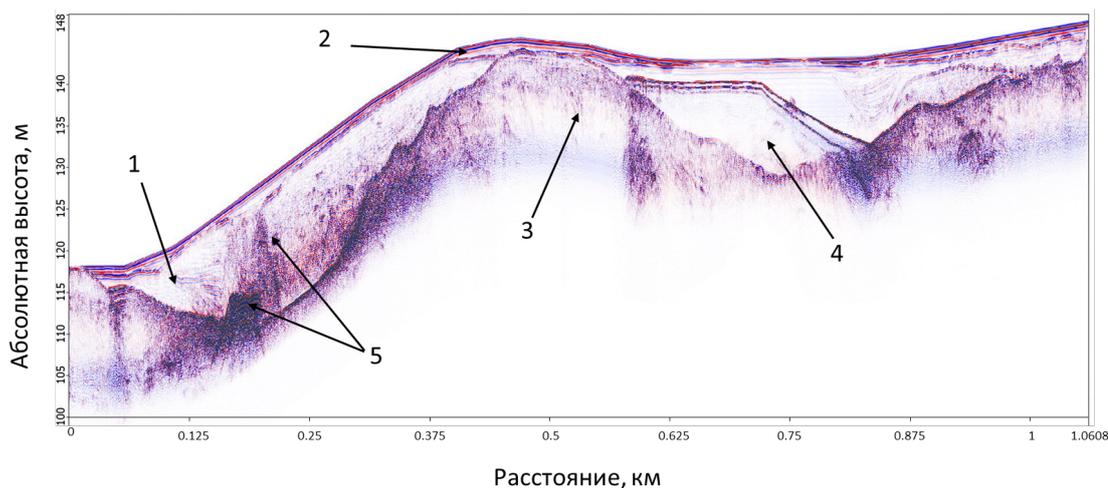


Рис. 4: Глубинный разрез по дороге. 1 – снежно-ледовая перемычка, 2 – снег, 3 – скальное основание, 4 – озеро Топографов, 5 – дифракции, в снежно-ледовой перемычке.

методическими работами: исследование озёр с глубиной до 15 м и снежно-ледового барьера между озёрами мощностью до 40 м.

Георадарное профилирование осуществлялось по сети маршрутов, располагающихся в крест простираения изучаемых структур. В соответствии с общепринятой методикой выполнялась съёмка и по секущим маршрутам для взаимной увязки данных. Работы выполнялись пешим ходом.

В распоряжении рабочей группы были отечественные и зарубежные картографические материалы разных годов выпуска: (1) топографическая карта оазиса Ширмахера от Министерства морского флота СССР в масштабе 1:25000 (Оазис Ширмахера... , 1972); (2) топографическая карта на район советской Антарктической научной станции Новолазаревская в масштабе 1:2000 (Советская антарктическая... , 1984); (3) топографическая карты оазиса Ширмахера в масштабе 1: 50000 (Атлас океанов, 2005); (4) постоянно пополняемая база данных Antarctic Digital Database v. 7.3 (ADD, 2021), однако использовались они лишь как обзорные материалы, также необходимо отметить, что поверхность ледника, озёр и снежников не постоянна в антарктических оазисах, где имеет место явление прорыва озёр. Для получения актуальной информации о рельефе района на момент выполнения работ была проведена тахеометрическая съёмка. Она подразумевает собой измерение на местности горизонтальных и вертикальных углов и расстояний до пикетов (Поклад, 2007). Съёмка выполнялась с использованием тахеометра Trimble M3 DR 5" (Trimble Navigation Ltd, USA). Пикеты выбирались на морфологически зна-

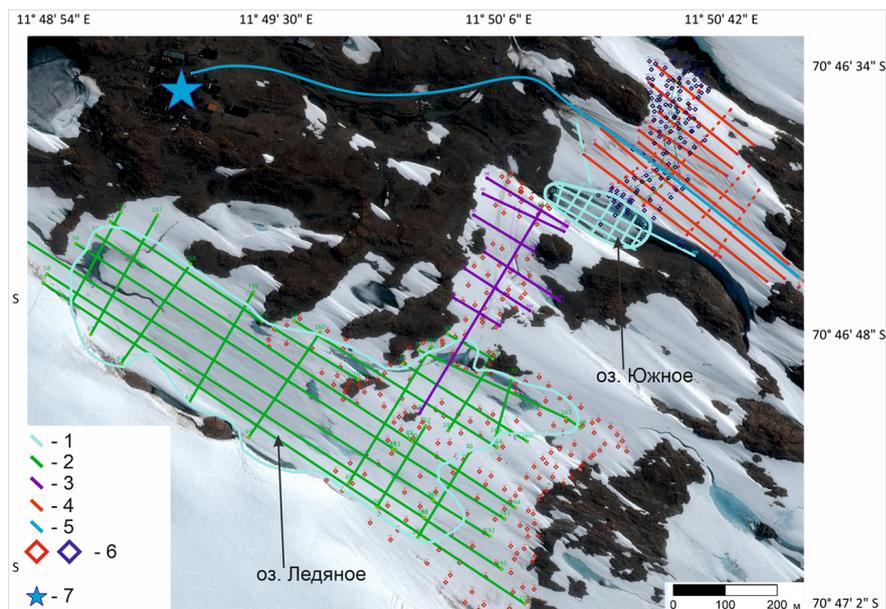


Рис. 5: Схема расположения работ на каскаде озёр: 1 – береговая линия озёр; 2 – георадарные маршруты оз. Ледяное и оз. Южное; 3 – георадарные маршруты по малому гроту, 4 – георадарные маршруты по большому гроту; 5 – трасса санно-гусеничного похода; 6 – точки тахеометрической съёмки; 7 – станция Новолазаревская.

чимых участках рельефа местности: гребнях, тальвегах, перегибах, уровне высоких вод и т.п. для того, чтобы наиболее полно охарактеризовать территорию съёмки (Ласточкин, 1991). Таким образом, густота пунктов измерений зависела от сложности рельефа местности и размеров района. При этом сеть всегда прокладывалась из соображений наиболее полного покрытия района работ. Передвижение между пикетами осуществлялось пешим порядком. Сеть съёмочного обоснования создавалась в виде тахеометрического хода, который служил для назначения последующих пунктов стояния прибора в случае, если рельеф местности или размер территории не позволял произвести съёмку из одного места стояния. Всего на изучаемых озёрах и гротах было выполнено 563 измерения. Площадь территории, покрытая съёмкой, составила 0.34 км². В ходе выполнения съёмки программное обеспечение тахеометра автоматически рассчитывает положение пикетных точек в пространстве. Погрешность выполненной тахеометрической съёмки составила около одного сантиметра как в плане, так и по высоте.

Для повышения точности привязки и определения расстояний использовался одометр. Для уточнения скоростей в средах использовали метод годографа дифрагированной волны, а на перемычке между Южным и Станционным озёрами использовали

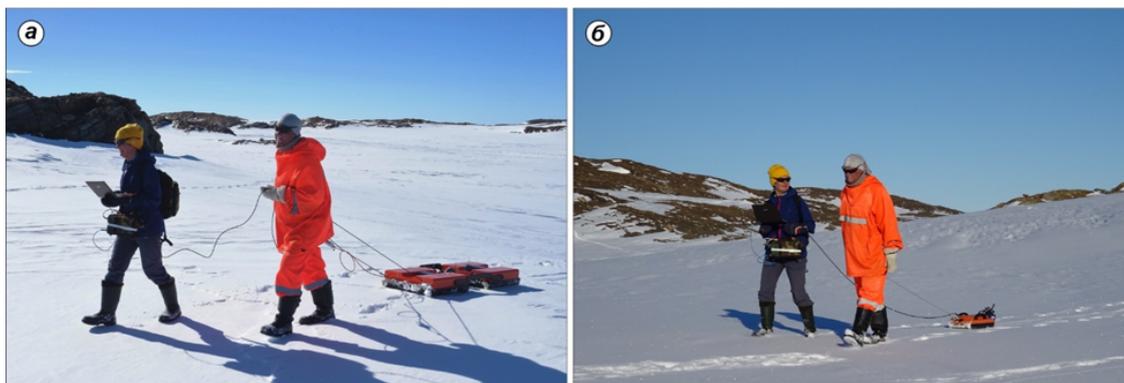


Рис. 6: Георадарное профилирование. *а*: работы с антенной АБ-150 (150 МГц) на озере Топографов, *б*: работы с антенной АБ-400 (400 МГц) на перемычке между озёрами Южное и Станционное.

метод ОГТ.

Перед применением метода общей глубинной точки было необходимо выбрать площадку для исследований, где отражающая граница была контрастной и имела бы горизонтальное положение. Эта задача выполнялась георадарной съёмкой на постоянной базе. На рисунке 7 представлены радарограммы площадки, где проводилась съёмка методом ОГТ. Профили располагались перпендикулярно.

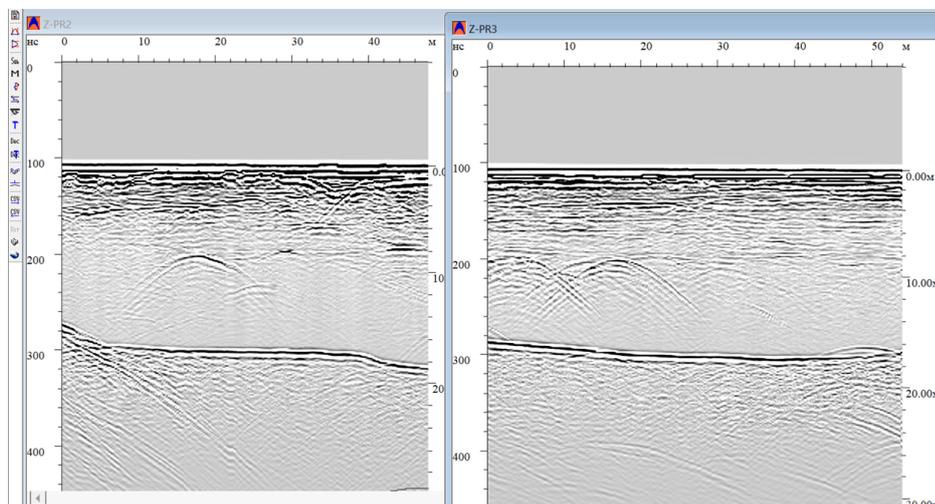


Рис. 7: Радарограммы площадки, где проводилась съёмка методом ОГТ. Задержка сигнала на 100 нс связана с прохождением сигнала по длинному оптоволоконному проводу.

Скорость электромагнитных волн определяется посредством измерений времени задержки сигнала отраженной волны на разных расстояниях между источником и приёмником. Методика работы следующая: фиксируется точка, над которой начинается



Рис. 8: Съёмка методом ОГТ.

зондирование. Далее передающая и принимающая антенны равномерно разносятся по разные стороны (рис. 8). Важно фиксировать расстояние, на которое были разнесены антенны. Начальное расстояние между антеннами составило 0.62 м, каждый блок двигали на 0.5 метра дальше, суммарное приращение за раз составляло 1 м. После разноса антенн производится съёмка. Далее антенны опять разносятся. Пройденная длина должна быть минимум в 2 раза больше предположительной глубины границы. Поэтому для таких работ подходят только бистатические антенны. Ограничение по максимальному расстоянию зависит от степени поглощения сигнала (поэтому важно, чтобы отражающая граница была яркой и прослеживалась на больших удалениях) и от возможности самой аппаратуры, конкретно — длины провода. Максимальное расстояние между антеннами составило 18 метров.

5. Методика обработки данных

Определение относительной диэлектрической проницаемости методом ОГТ

Важным этапом любого георадарного исследования являются преобразования временного разреза в глубинный, определение мощности толщ, слагающих разрез и определение типа породы и грунта. Благодаря этому решаются задачи геологии, экологии, мерзлотоведения, картирования. Для всех этих действий необходимо определить скорость распространения электромагнитных волн в среде и относительную диэлектрическую проницаемость самой среды. Это может быть проблематично, когда нет априорных данных. Причем, почти всегда требуется именно точное значение скорости, поскольку от этого зависит мощность толщ в глубинном разрезе или определение состава, состояния толщи.

После поиска площадки с контрастной горизонтальной границей и проведения съемки начинается обработка данных. Для начала получаем годограф, представленный на рисунке 9:

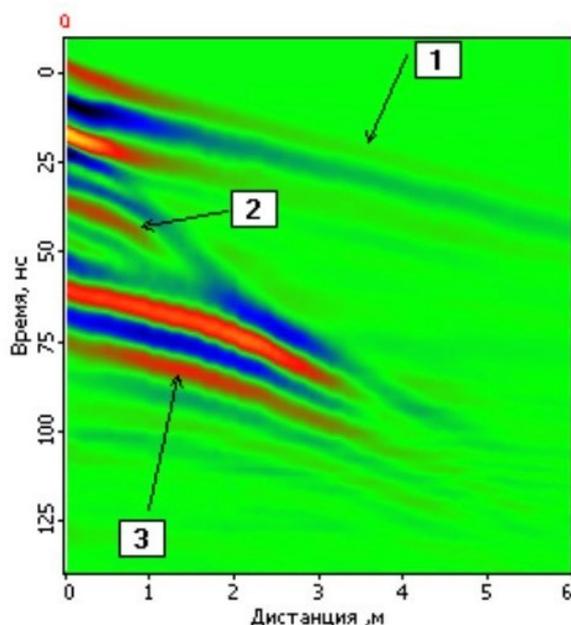


Рис. 9: Годограф, полученный при съемке методом ОГТ. 1 – траекторный сигнал воздушной волны. Всегда представлен наклонной прямой, 2, 3 – траектория сигналов, отраженных от границ. (Prism2.60. Инструкция пользователя)

Последующая обработка происходит при помощи программного обеспечения. Для данной работы применялась программа Prism2.6. ПО предназначено как для работы в поле, так и для стационарной обработки и интерпретации полученных данных.

Программа имеет функцию определения скорости распространения электромагнитной волны в толще. Для этого с помощью функции «Годограф» вносятся положения воздушной волны и границы слоев. Важно отметить границу максимально точно, так как неточность в отметке положения сильно влияет на получаемый результат. После отметки положений воздушной волны и границ программа выдает численные результаты для каждого слоя: мощность, скорость электромагнитной волны, относительную диэлектрическую проницаемость и среднеквадратичное отклонение ошибки приближения (рис. 10).

Ступенчатый вид годографа получается благодаря методике съёмки, когда георадар включается после изменения разноса блоков антенн. Это помогает более точно проводить пикирование сигналов от воздушного и отражающего сигналов.

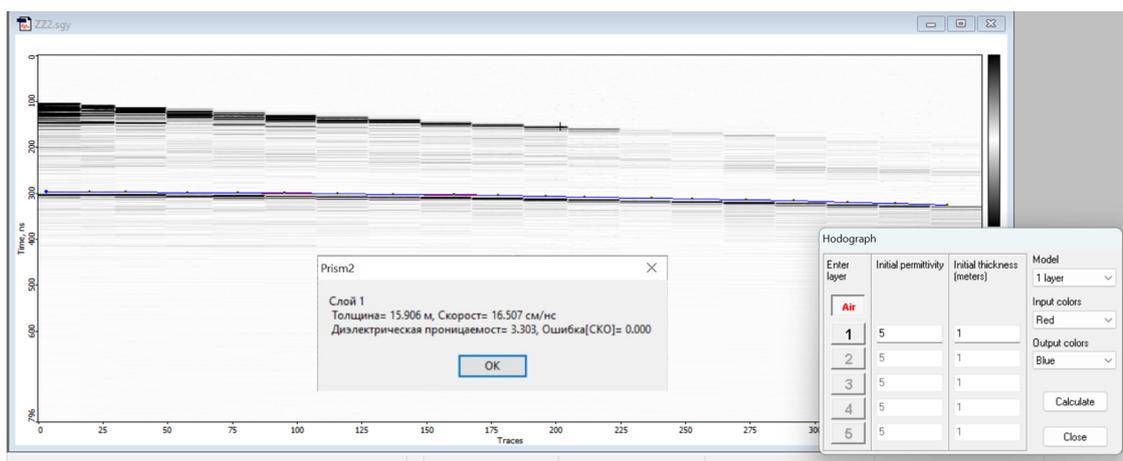


Рис. 10: Вывод данных после применения функции «Годограф». В окне справа задается количество слоев, воздушная волна и начальные значения мощности и относительной диэлектрической проницаемости слов. По центру представлены выходные данные.

Так выглядит годограф по профилю ZZ1 (рис. 11). Перпендикулярно ему снимался профиль ZZ2 (рис. 12).

После применения процедуры «Годограф» и пикирования отражений было получено значение относительной диэлектрической проницаемости 3.303 по профилю ZZ1 и 2.952 по профилю ZZ2. Относительная диэлектрическая проницаемость льда равна 3

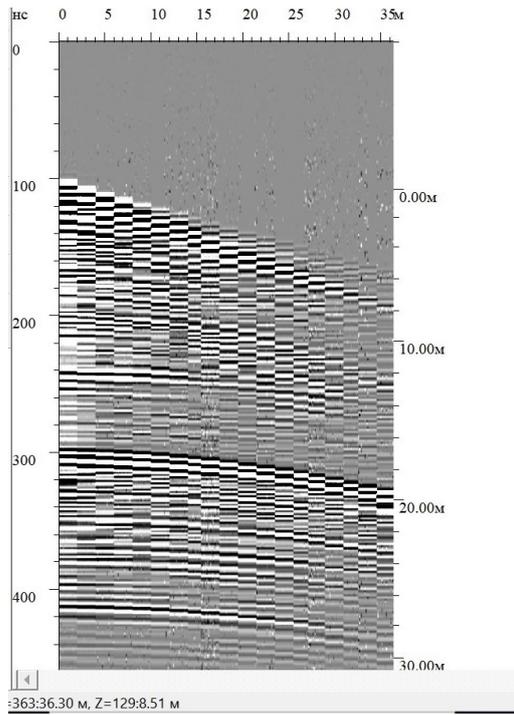


Рис. 11: Годограф по профилю ZZ1.

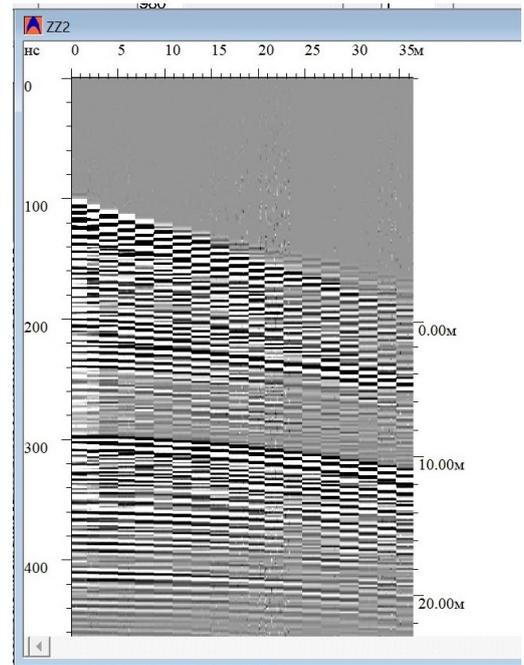


Рис. 12: Годограф по профилю ZZ2.

(Таблица 2). Таким образом был сделан вывод что снежно-ледовая перемычка сложена льдом.

Обработка георадарных данных

Процесс с момента получения данных до создания пакета карт можно разделить на несколько этапов:

1) Обработка радарограмм;

1 этап. Обработка полевых георадарных данных.

Работа непосредственно с радарограммами велась в программе Prism2.6 (RadSys Ltd., Латвия), дополнительно использовалась GeoScan32 (НПЦ Геотех).

Этап обработки радарограмм включает в себя первичную оценку качества данных, выбор профиля усиления, ввод топографии (привязка профилей и ввод рельефа), оцифровку границ различных сред с учётом диэлектрической проницаемости, пересчёт временного разреза в глубинный и получение данных в цифровом виде. В качестве примера данных до обработки представлен рисунок 13, радарограмма с введёнными координатами и топографией — рисунок 14.

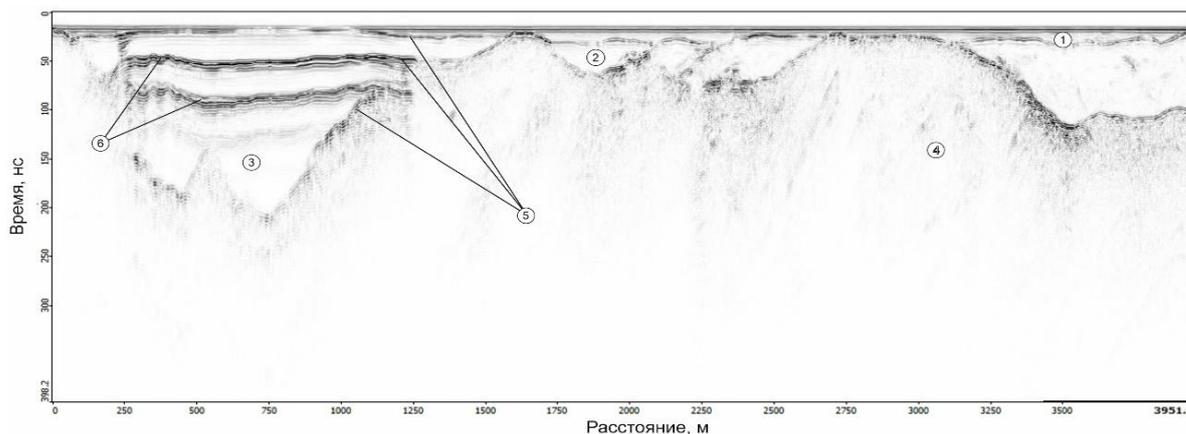


Рис. 13: Временной георадарный разрез. 1 – снег; 2 – лед; 3 – вода; 4 – скальный фундамент; 5 – отражения от границ разных сред; 6 – кратные волны.

Начало и конец каждого профиля были привязаны к снятым координатам. Это позволяло зафиксировать расстояние, пройденное во время профилирования — «длину радарограммы».

Благодаря проведённой тахеометрической съёмке для каждого профиля был снят массив абсолютных высот поверхности. Реперные точки наносятся на радарограммы с помощью функции «Маркер». Затем маркерам присваивается абсолютная высота и профиль приобретает топологическую привязку — «рельеф».

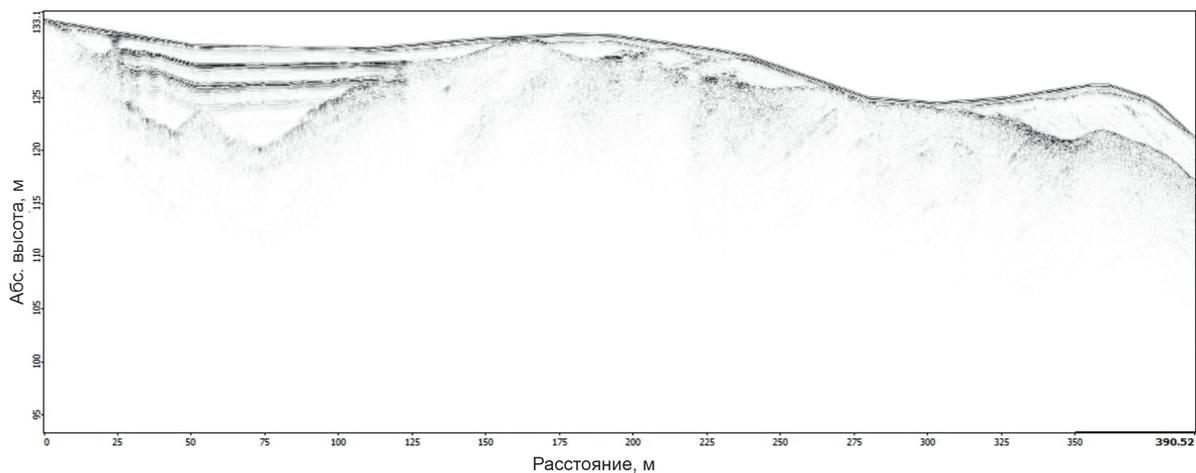


Рис. 14: Временной разрез с введёнными координатами начала и конца профиля, топографией.

После этого на каждой радарограмме определяли границы снега и льда, льда и воды, льда и скалы, воды и скалы. По этим границам были определены полигоны и назначены диэлектрические проницаемости. Для снега 2, льда 3, воды 85, а скального фундамента 9 (Таблица 2). После этого был произведен перевод временного разреза в глубинный. И только теперь мы можем наблюдать фактический «разрез» (рис. 15). После получения глубин залегания границ и мощностей были выделены рельеф и все границы сред, значения оцифрованы в текстовый файл.

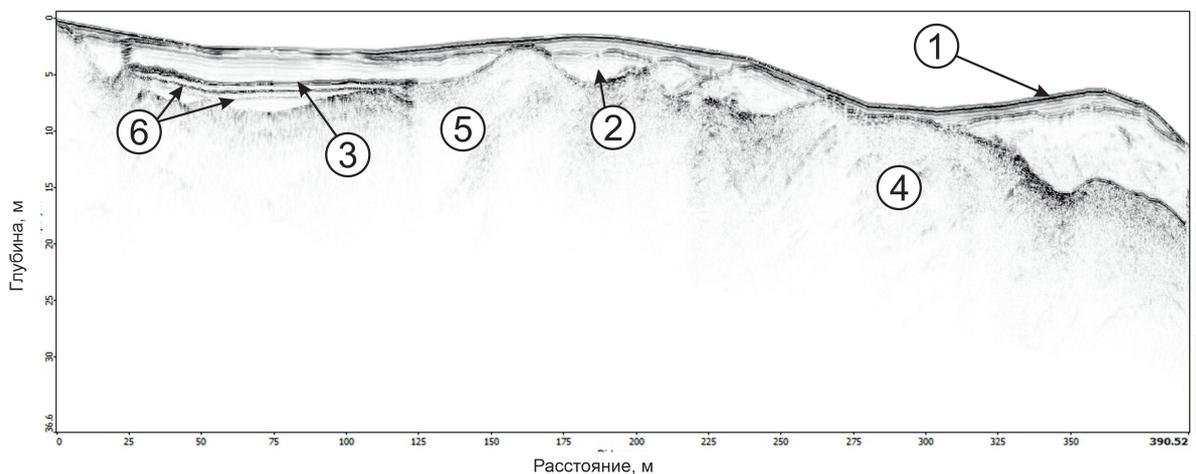


Рис. 15: Глубинный разрез. 1 – снег, 2 – лёд, 3 – граница лёд-вода, 4, 5 – скальное основание, 6 – кратные волны.

Таким образом, в конце первого этапа мы имеем набор профилей с топопривязкой, глубинных профилей, профилей с выделенными границами и оцифрованные границы,

по которым уже можно строить схематические карты изолиний.

2 этап. Создание схем мощности снега, льда, воды, рельефа.

Этот этап работы связан с работой в ПО Surfer (Golden Software) и Excel.

Первым шагом является перенос всех границ в единые таблицы: рельеф каскада, кровля и подошва льда каскада, дно озёр и кровля скального фундамента. Далее в Surfer подгружается карта района и задается зона (32S). Из таблиц Excel формируются по стандартной методике grids и добавляются на карту как схема изолиний. Для рельефа в данные для гридирования также добавляются точки, полученные в ходе тахеометрической съёмки.

Такие схематические карты составляются для рельефа, кровли и подошвы снега, льда и воды, кровли скального фундамента, а затем для снега, льда и воды составляются схемы изолиний мощности, путём вычитания одного грида из другого.

6. Результаты

В результате были получены карты изолиний высотных отметок рельефа дневной поверхности и скального основания (рис. 16, 17).

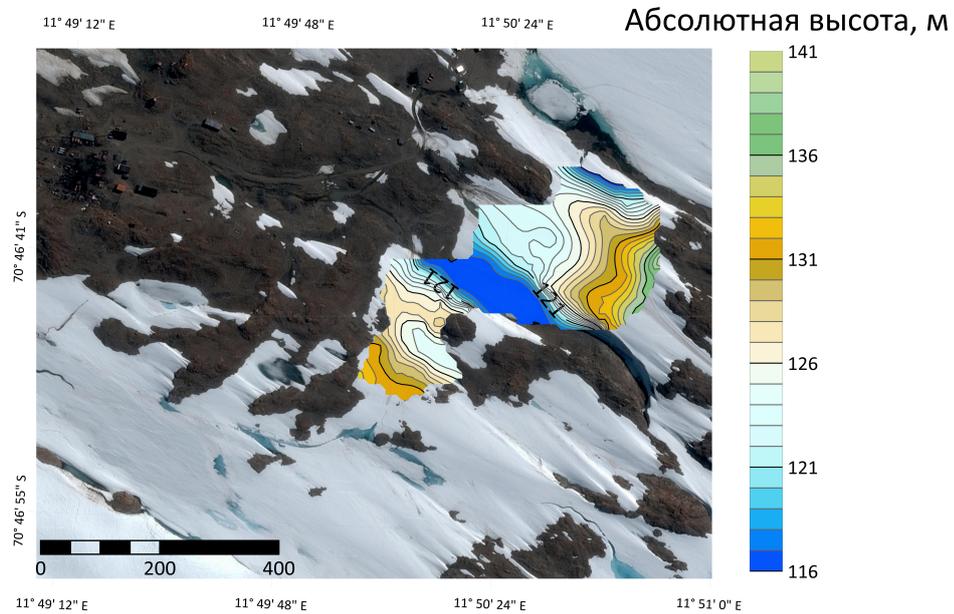


Рис. 16: Рельеф дневной поверхности.

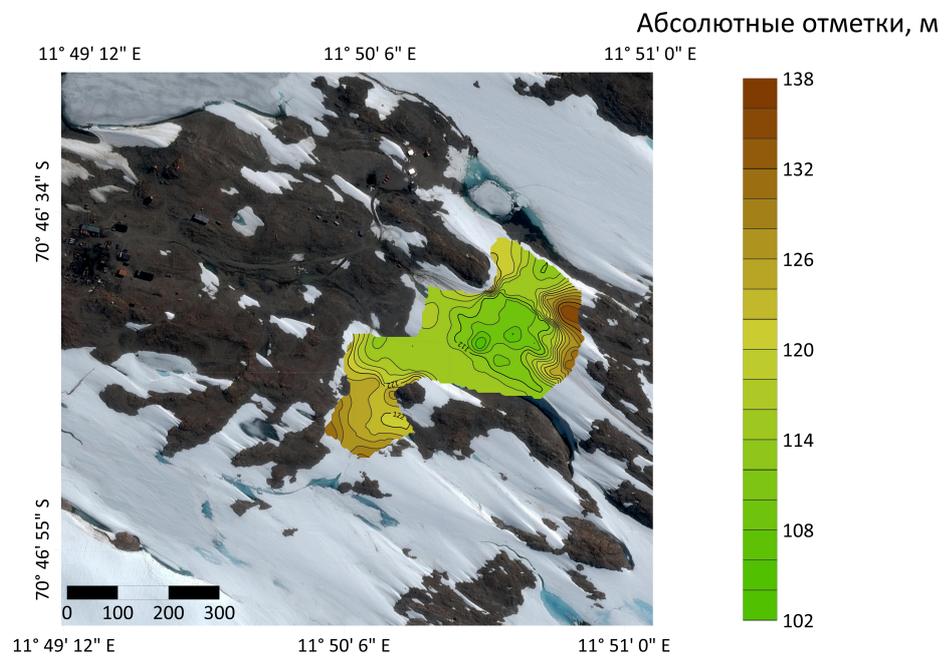


Рис. 17: Рельеф скального основания.

Высотные отметки дневной поверхности варьируются от 116 м до 140 м. Замет-

ное повышение рельефа наблюдается в северо-восточной части. Абсолютные отметки скального рельефа находятся в пределах 106–136 м. Повышение рельефа отмечается также в северо-восточной части, это также было видно на глубинном разрезе по дороге. Таким образом, северо-восточная часть каскада ограничена скальным выступом. Также наблюдается изометричное понижение рельефа к северу от озера Южное.

Далее были построены схемы мощности снежного и ледового покрова (рис. 18, 19).

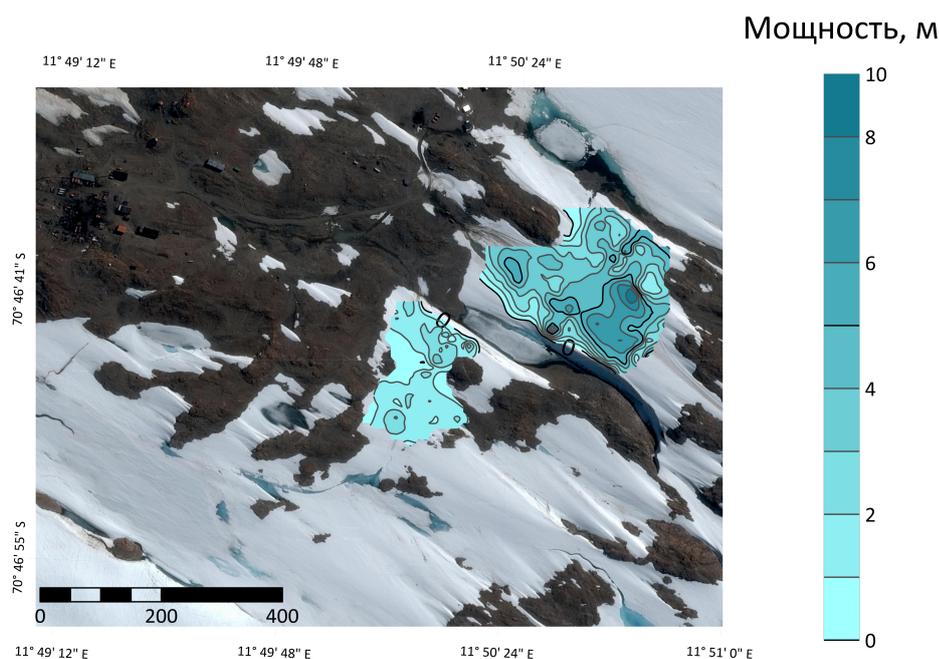


Рис. 18: Распределение мощности снежного покрова.

На момент проведения работ мощности снежного покрова не превышали 10 м, а ледового — 20. Максимальные значения мощности снега соответствуют северо-восточной части каскада, подножию скального выступа.

Озеро Южное имеет вытянутую форму. Озеро характеризуется длиной около 170 м и шириной около 50 м. На момент проведения исследований глубина озера не превышала 2 метров. Глубина озера достигает пиковых значений в восточной части вблизи снежно-ледовой перемычки.

Далее были изучены барьеры, разделяющие озёра между собой, поскольку по перемычке между озёрами Южное и Станционное проходит трасса, соединяющая станцию и аэродром. По серии параллельных радарограмм прослеживаются неоднородности в толще льда (рис.21, 22). В реальности эти неоднородности и дифракции вызваны гротами. Грот — это канал в толще льда, который выработал водный поток. По временным

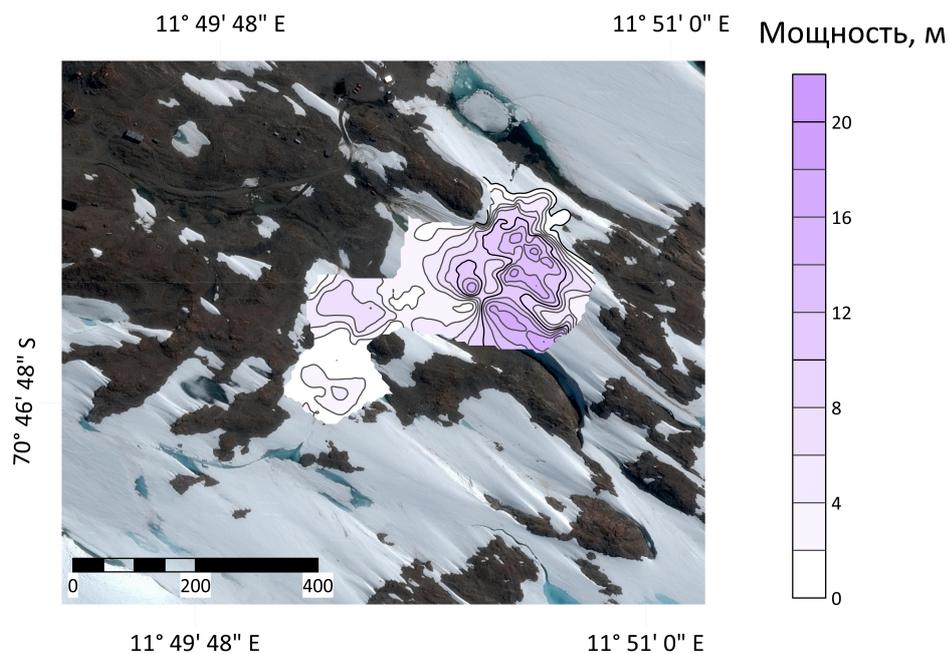


Рис. 19: Распределение мощности льда.

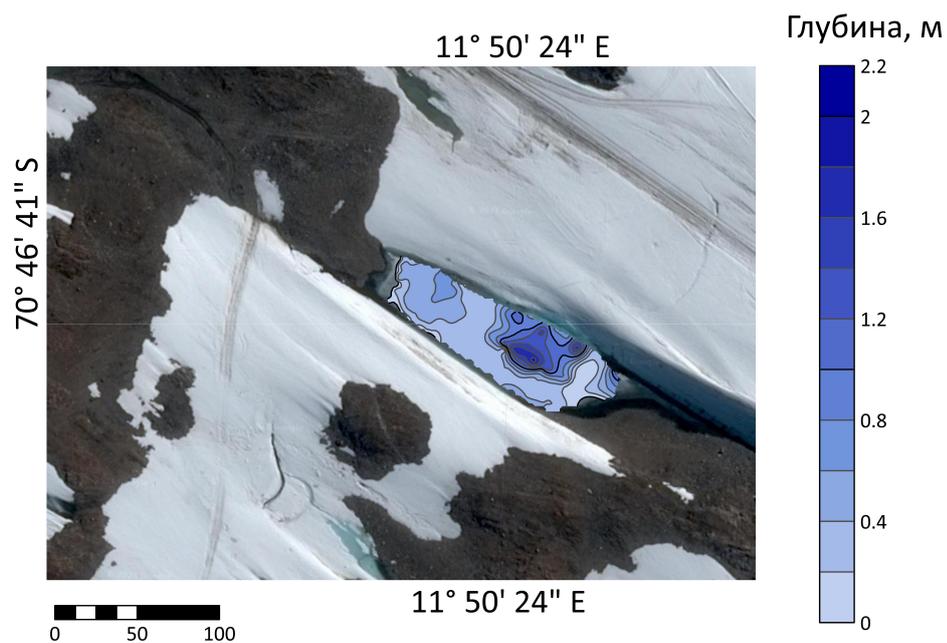


Рис. 20: Схема распределения глубины озера Южное.

разрезам можно отметить примерное положение этих тоннелей и оценить их изменение в пространстве (рис. 25). Тоннель между Ледяным и Южным имеет длину 230 м, ширина в среднем составляет около 12 м. Форма грота практически прямая, однако в середине грот немного меняет направление. На рис. 23 и рис.24 представлены фотографии гротов. Можно отметить, что придонная часть грота сложена скальными породами

с небольшим слоем льда, а стенки гротов — ледяные и «отшлифованные» водным потоком. Внутри гроты осложнены наледями, сосульками и прочими включениями.



Рис. 21: Фотография перемычки между Южным и Станционным. Красными линиями показаны положения профилей.

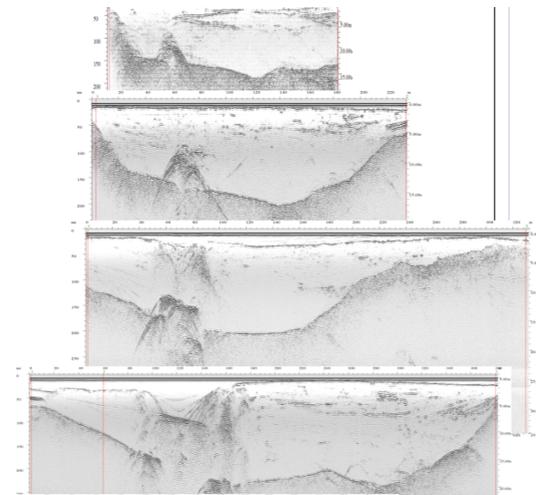


Рис. 22: Временные разрезы, на которых прослеживается грот.



Рис. 23: Фотография грота. Декабрь 2021 г.

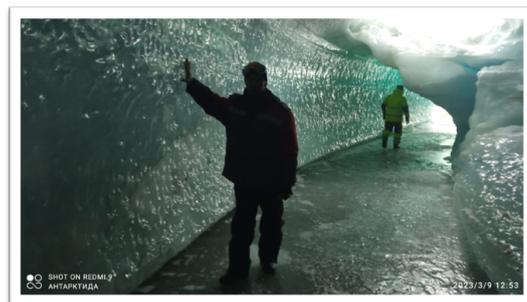


Рис. 24: Фотография грота. Декабрь 2021 г.

Тоннель между Южным и Станционным берёт свое начало в понижении дна Южного. В этом месте грот имеет ширину порядка 50 м и высоту до 6 м. Постепенно грот уменьшается: в середине перемычки ширина грота составляет около 20 м, а высота — около 4м. Около озера Станционное тоннель вырождается в сеть ручьев, которые можно увидеть на фотографии каскада. Длина тоннеля, по которому идёт сток воды, составляет 260 м.

По радарограммам выделяется прогиб к северу от озера Южное, заполненный снегом (рис.26). Такая структура образована в результате обрушения кровли грота с последующим заполнением понижения снегом. То, что складка заполнена снегом, подтверждается шнековым бурением, сделанным на глубину 6 м. Наличие слоев внутри прогиба

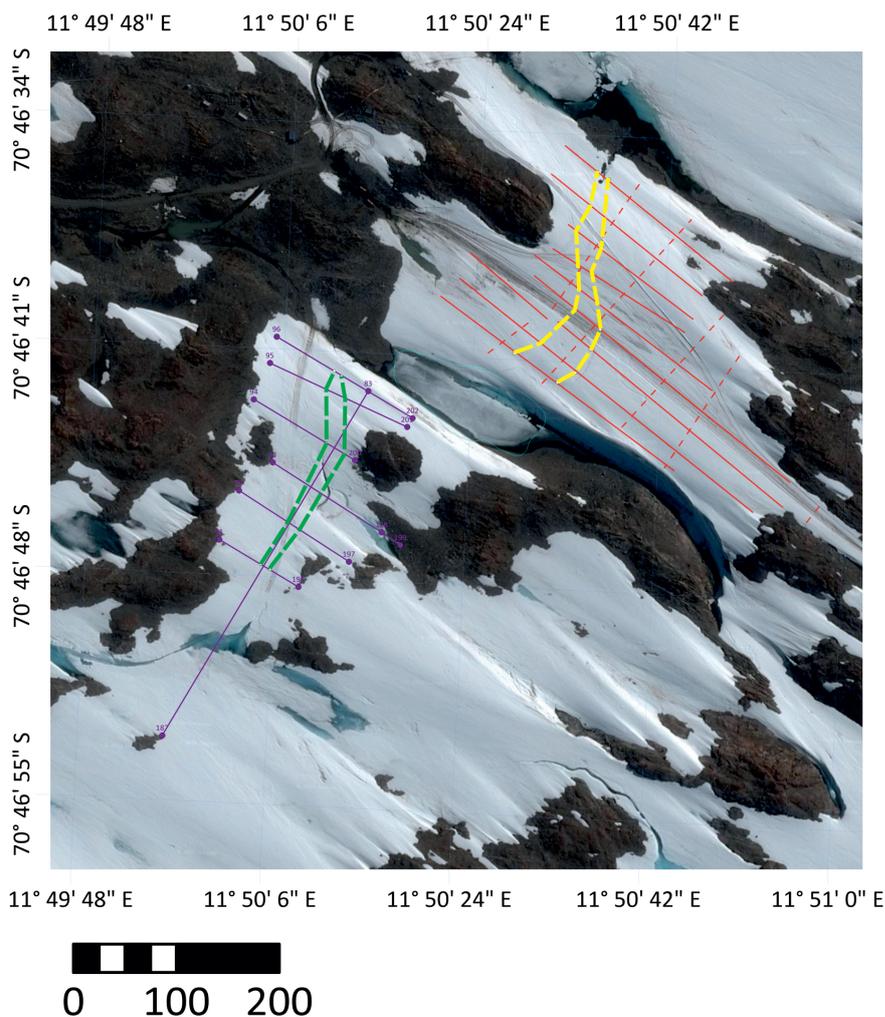


Рис. 25: Положение гротов в плане.

показывается, что накопление снега идёт уже продолжительное время.

Однако недавно произошло обрушение кровли грота, что позволило подтвердить полученные данные о ширине большого грота вблизи озера Южное (рис.27). Также полученная депрессия показывает, что место с прогибом является ослабленной зоной и тоннель в большом гроте имеет наследственный характер.

После построения карт изолиний отражающих границ и мощностей снега, льда и глубины озера Южное начинается создание объёмной модели каскада. Из-за сложности строения каскада общая 3D-модель не очень проста для понимания, поэтому строятся вспомогательные объёмные модели для частей каскада (рис.28). Также был построен разрез через весь каскад озёр по линии А-В-С-D-E-F-G-H-I (рис. 29), что позволяет проследить пространственное расположение озёр и гротов. Некоторые части тоннеля проведены пунктиром, поскольку не удалось проследить их точное положение.

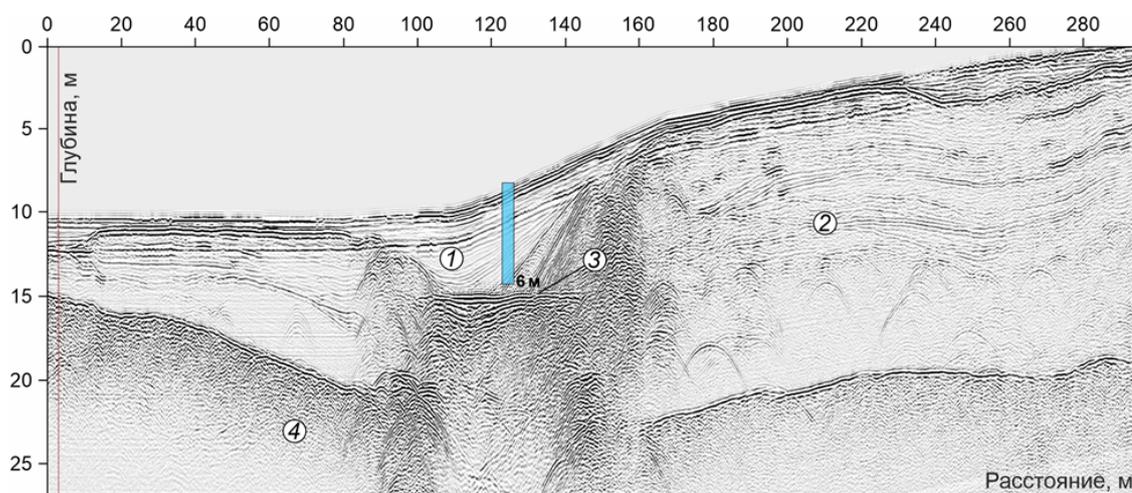


Рис. 26: Георадарный разрез над гротом между озёрами Южное и Станционное. 1 – снежно-фирновая толща; 2 – ледяная толща; 3 – кровля тоннеля; 4 – скальные породы. Голубым прямоугольником показана скважина.



Рис. 27: Фотографии со стороны оз. Южное на большой грот. Фотография слева сделана в декабре 2021 года, фотография справа – в конце марта 2023 года.

После построения модели и анализа результатов можно оценить объём воды в озёрах и критические условия, при которых произойдет сброс воды по гротам. Расчётный объём воды в озере Южное на момент проведения работ составил 5100 м^3 . Было рассчитано, что при повышении уровня воды в озере Южное на 2 м, начнётся поступление воды в существующий большой грот. Такое можно ожидать, например, при обычном таянии льда на его поверхности. Однако для заполнения большого грота и перелива в озеро Станционное необходимо, чтобы уровень поднялся практически на 5 метров по сравнению с уровнем воды на момент съёмки. Такое возможно при увеличении объёма воды в озере Южное на 40600 м^3 . Причиной разгрузки таких объёмов воды может

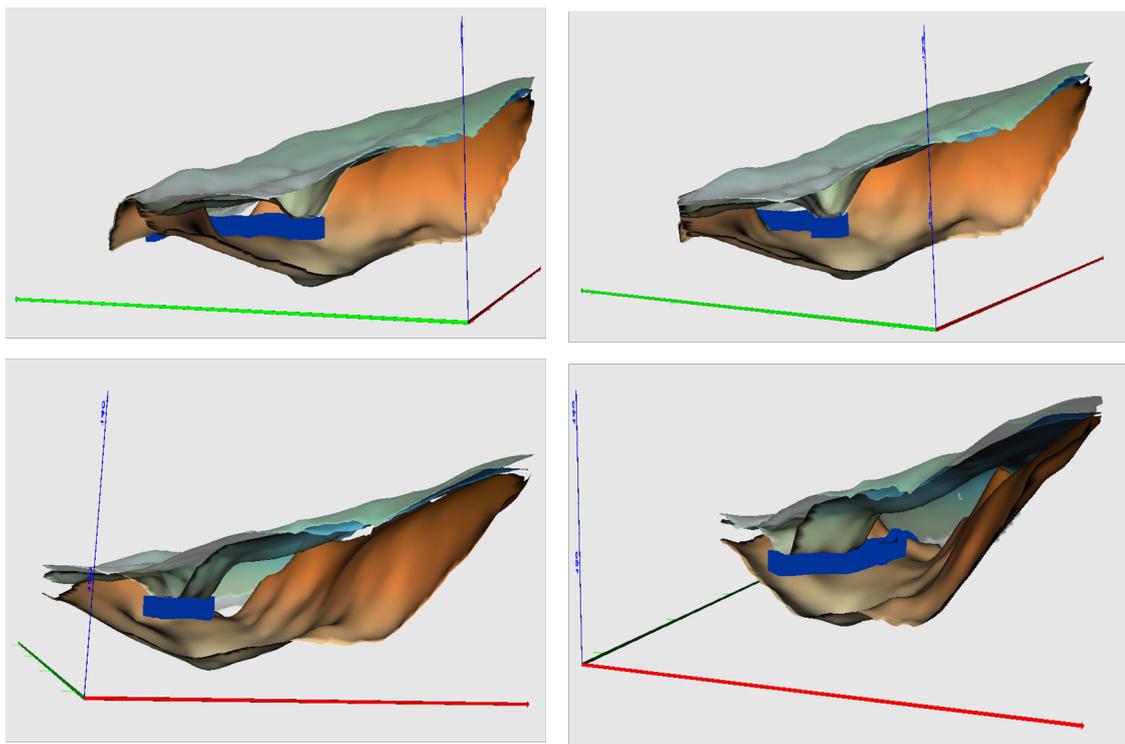


Рис. 28: Объёмная модель грота между озёрами Южное и Станционное. Зелёная стрелка соответствует северному направлению, красная – восточному. Синим цветом обозначен грот, по которому происходит сход воды, сине-зелёным цветом обозначена снежная толща, оранжевым – скальный фундамент. Толща льда, в которой находится грот, сделана прозрачной.

быть накопление большого количества осадков и быстрое повышение температуры или обрушение глыб льда в вышележащее озеро Ледяное.

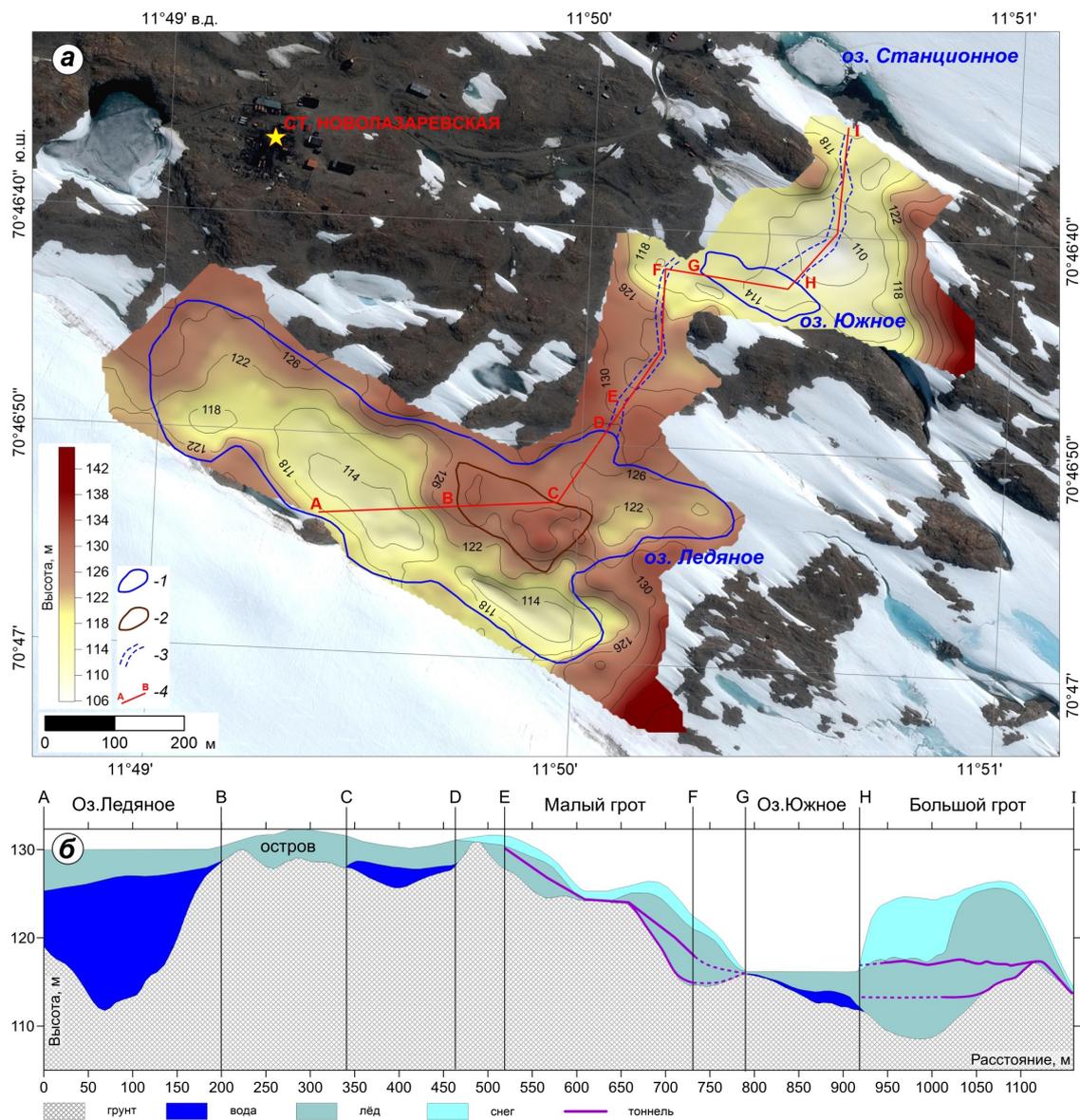


Рис. 29: Секция *a* — карта изолиний высоты скального основания каскада Ледяное-Южное-Станционное: 1 — береговая линия; 2 — остров; 3 — положение каналов; 4 — положение линии разреза с секции *b*. Пунктиром показано предполагаемое положение тоннелей. Секция *b* — 2D-модель каскада озёр.

Заключение

Благодаря данным полученным с помощью георадиолокации был изучен каскад прорывоопасных озёр Ледяное-Южное-Станционное.

С помощью обработки годографа ОГТ была получена относительная диэлектрическая проницаемость среды, где находятся гроты, благодаря чему удалось определить, что они находятся в толще льда. Полученное значение параметра было использовано в последующей обработке.

Обработка радарограмм по перемычкам между озёрами и самого озера Южное дала возможность собрать пакет карт изолиний, для рельефа, снега, льда и воды. Также по серии радарограмм были обнаружены и прослежены положения и размеры гротов, по которым идёт сток воды по каскаду. Анализ обработанных материалов даёт возможность всесторонне изучить морфометрические характеристики гидрогеологических объектов всего каскада. Данные, полученные в результате проделанной работы, легли в основу построения 2D- и 3D-моделей каскада, что необходимо для последующего моделирования развития ледниковых озёр и их прорывов через ледовые дамбы. Это позволит лучше изучить механизм прорыва подлёдных озёр.

Оазис Ширмахера является перспективным для изучения явления прорывоопасных озёр как с научной точки зрения, так и с практической, поскольку по изучаемому объекту проходит трасса санно-гусеничного похода. Недавнее обрушение кровли грота вблизи трассы подтверждает актуальность данной работы и необходимость поиска более безопасных альтернатив прохождения трассы, соединяющей станцию Новолазаревская с аэродромом. Исследования геофизическими методами позволяют следить за развитием каскада озёр не только на оазисе Ширмахера, но и в других частях материка, где имеют место быть каскады подлёдных прорывоопасных озёр. Кроме того, благодаря мониторингу можно прогнозировать вероятность и критические условия для прорыва перемычек и образования депрессий. Подобные геофизические явления могут являться хорошим дополнением к гидрогеологическим исследованиям.

Благодарности

Выражаю благодарность Кашкевич Марине Петровне, Романовой Наталье Евгеньевне и Попову Сергею Викторовичу за помощь и советы на разных этапах работы. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №20-05-00343 «Выявление особенностей

протекания процесса прорывов озёр оазисов Антарктиды на основе данных полевых исследований и математического моделирования».

Список литературы

1. Богородский В., Бентли Ч., Гудмансен П. Радиогляциология. Л: Гидрометеиздат, 1983, 314 с.
2. Боронина А.С. Крупные прорывы озёр антарктических оазисов: обобщение современных явлений // Лёд и снег. – 2022. – Т. 62, № 1. – С. 141–160.
3. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие.: Изд-во МГУ, 2004. 153 с.
4. Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. :ГЕОС, 2017. - 239 с.
5. Григорьева С.Д., Киньябаева Э.Р., Кузнецова М.Р., Попов С.В., Кашкевич М.П. Строение снежно-ледовых перемычек прорывных озёр полуострова Брокнес (оазис Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида) по данным георадиолокации // Лёд и снег. – 2021. – Т. 61, № 2. – С. 291–300.
6. Каминский В.Д., Иванов В.Л., Грикуров Г.Э., Поселов В.А. 60 лет исследования НИИГА-ВНИИОкеанология в Арктике и Антарктике: история, достижения, перспективы // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2008. – Т. 80, № 3.
7. Киньябаева Э.Р., Григорьева С.Д., Кузнецова М.Р., Миракин А.В., Попов С.В. Комплексные изыскания по организации площадки для хранения и сборки модулей нового зимовочного комплекса станции Восток в сезон 65-й Российской антарктической экспедиции // Российские полярные исследования. – 2020. – № 3. – С. 32–35.
8. Лазарев Г.Е., Ушаков С.А. Строение подлёдного рельефа центральной части Восточной Антарктиды // Бюл. САЭ. – 1964. – Т. 49. – С. 29–32. 9. Ласточкин А.Н. Рельеф земной поверхности. // Ленинград : Наука : Ленингр. отд-ние, 1991. – 339 с.
10. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников // М. Научный мир. 2006. С. 389.
11. Поздеев В.С., Куринин Р.Г. Новые данные о морфологии ледовой толщи и рельефе подлёдного ложа и морского дна южной части бассейна моря Уэдделла (Западная Антарктида) // Антарктика. – 1987. – Т. 26. – С. 66–71.
12. Поклад Г.Г., Гриднев С.П. Геодезия: учебное пособие для вузов // М.: Академический Проект, 2007.– 592 с.
13. Попов С.В., Боронина А.С., Пряхина Г.В., Григорьева С.Д., Суханова А.А., Тюрин С.В., Прорывы ледниковых и подледниковых озёр в районе холмов Ларсеманн

- (Восточная Антарктида) в 2017—2018 гг. // Геориск. – 2018. – Т. 12, № 3. – С. 56–67.
14. 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.
15. Попов С.В., Межонов С.В., Поляков С.П., Мартьянов В.Л., Лукин В.В. Гляциогеофизические инженерные изыскания для подготовки лётного поля в районе российской станции Мирный, Восточная Антарктида // Лёд и Снег. – 2016. – Т. 56, № 3. – С. 413–426.
16. Попов С.В., Поляков С.П., Пряхин С.С., Мартьянов В.Л., Лукин В.В. Применение гляцио-геофизических методов для обеспечения безопасности логистических операций в Антарктиде // Российские полярные исследования. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 29–31.
17. Попов С.В., Суханова А.А., Поляков С.П. Применение метода георадарного профилирования для обеспечения безопасности транспортных операций Российской антарктической экспедиции // Метеорология и гидрология. – 2020. – № 2. – С. 126–131.
18. Пряхина Г.В., Четверова А.А., Григорьева С.Д., Боронина А.С., Попов С.В. Прорыв озера Прогресс (Восточная Антарктида): подходы к оценке характеристик прорывного паводка // Лёд и Снег. – 2020. – Т. 60, № 4. – С. 613–622.
19. Шнюков С.Е. Проект глобального геологического исследования подледниковой Антарктиды: результаты реализации и возможное дальнейшее развитие // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2013. – Т. 1. – С. 10–327
20. Blindow, N., Eisenburger, D., Illich, B., Petzold, H., Richter, T. Ground Penetrating Radar. In: Environmental Geology. Springer, Berlin, Heidelberg – 2009.
21. Daniels D.J. Ground penetrating radar. The Institution of Electrical Engineers, London, UK – 2004.
22. Fitzgerald P.G., Goodge J.W. Exhumation and tectonic history of inaccessible subglacial interior East Antarctica from thermochronology on glacial erratics. // The Cryosphere. – 2022. – Vol. 13, no. 6217.
23. Lee G., Ahn J., Ju H., Ritterbusch F., Oyabu I. et al. Chronostratigraphy of the Larsen blue-ice area in northern Victoria Land, East Antarctica, and its implications for paleoclimate // The Cryosphere. – 2022. – Vol. 6, no. 16. – P. 2301–2324.
24. Leitchenkov G.L., Antonov A.V., Luneov P.I., Lipenkov V.Ya. Geology and environments of subglacial Lake Vostok // Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci. – 2016. – Vol. 374, №.

2059.

25. Malmberg C.G., Maryott A.A. Dielectric constant of water from 0°C to 100°C. // Journal of Research of the National Bureau of Standards. – 1956. – Vol. 56, №. 1. – P. 1–8.

26. Paxman G.J.G., Jamieson S.S.R., Hochmuth K., Gohl K., Bentley M.J., Leitchenkov G., Ferraccioli F. Reconstructions of Antarctic topography since the Eocene–Oligocene Boundary // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2019. – Vol. 535.

27. Sanyal A.K., Venkataraman K., De J.K., Bulganin Mitra. Impact of climate change on the diversity and distribution of moss-inhabiting invertebrate fauna in Schirmacher oasis, East Antarctica. // Quaternary International. – 2013. – Vol. 113, no. 2. – P. 85–90.

28. Sengupta S. Geology of Schirmacher Range (Dakshin Gangotri), East Antarctica. // 3rd Indian Antarctica Expedition. – 1986. – no. 3.

29. Sengupta S. Precambrian rocks of the Schirmacher range, east Antarctica. // Zeitschrift für Geologie Wissenschaften. – 1988. – no. 16.

30. Srivastava A.K., Randive K.R., Khare N. Mineralogical and geochemical studies of glacial sediments from Schirmacher Oasis, East Antarctica // Quaternary International. – 2013. – Vol. 292. – P. 205–216.

31. Wright N.A., Williams P.L. Mineral resources of Antarctica. – 1974.

32. Zheng Y., Wang S., Feng J., Ouyang Z., Li X. Measurement of the complex permittivity of dry rocks and minerals: application of polythene dilution method and Lichtenecker's mixture formulae // Geophysical Journal International. – 2005. – Vol. 163, no. 3. – P. 1195–1202.

33. Ширмахера Оазис. Топографическая карта. Масштаб 1:25000 // МинМорфлот СССР. – 1972.

34. Новолазаревская Советская антарктическая научная станция. Топографическая карта. Масштаб 1:2000 // ГУГК. – 1984.

35. ADD. Antarctic Digital Database, Version 7.3 // Scientific Committee on Antarctic Research, British Antarctic Survey, Cambridge. – 2021.

36. Prism2.6, инструкция пользователя. Рига, – 2022.

37. www.aari.ru