

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(СПбГУ)

Гинга Михаил Сергеевич

Выпускная квалификационная работа

**Оценка сезонного снегонакопления ледника Джанкуат по данным
георадиолокации**

Направление 05.04.01 «Геология»
Образовательная программа СВ.5018 «Геология»
Профиль «Геофизика»

Научный руководитель:

Доцент кафедры геофизики СПбГУ
кандидат геолого-минералогических наук
Кашкевич Марина Петровна

Рецензент:

Ведущий геофизик ООО «ГеофизПоиск»
Борисик Александр Львович

Санкт-Петербург
2020 г.

Оглавление:

Введение	4
Глава 1. Основы метода георадиолокации.....	6
Глава 2. Физико-географический очерк	15
Глава 3. Геофизическая изученность ледника	17
Глава 4. Георадарные исследования мощности сезонных осадков	21
4.1 Методика выполнения работ	21
4.2. Методика обработки данных	23
Глава 5. Результаты	26
Список литературы.....	28

Аннотация

Рассмотрены возможности применения метода георадиолокации для оценки сезонного снегонакопления на примере ледника Джанкуат (Приэльбрусье, Кабардино-Балкария) и особенности выполнения полевых работ в условиях высокогорных ледников. Представлен граф обработки данных и дана их интерпретация. Составлена карта мощности сезонного снегонакопления на леднике Джанкуат по данным снегомерных работ за 2018-2019 гг. с использованием георадиолокации.

Abstract

The possibilities of applying the georadar method for assessing seasonal snow accumulation by the example of the Dzhankuat glacier (Elbrus region, Kabardino-Balkaria) and the peculiarities of field work in high mountain glaciers are considered. A data processing graph is presented and their interpretation is given. A map of the seasonal snow accumulation capacity on the Dzhankuat glacier was compiled according to snow measurement data for 2018-2019 using georadar.

Введение

Ледник Джанкуат на Центральном Кавказе является объектом геофизических, гляциологических, гидрологических и других исследований на протяжении многих лет. В 1965 году, в рамках Международного гидрологического десятилетия (МГД) сотрудниками МГУ имени М.В. Ломоносова были начаты исследования данного долинного ледника. Целью этих работ являлось совместное измерение балансов тепла, жидкой воды и льда. Ледник Джанкуат был выбран как опорный для данных исследований по причине сходства его морфометрических параметров со среднестатистическим ледником Кавказа. С 1968 г. проводятся непрерывные ежесезонные изыскания. Также комплексные исследования позволили установить тенденции эволюции ледника и прогнозировать его изменения в будущем. В 1960–70х годах ледник Джанкуат был одним из полигонов по апробации геофизических методов исследований [Лаврентьев и др., 2014]. По продолжительности прямых инструментальных наблюдений и детальности полученных данных этот ледник можно считать наиболее изученным в России.

В 2018 году, впервые для определения мощности сезонного снегонакопления на леднике Джанкуат было выполнено георадарное профилирование. Этот сравнительно молодой геофизический метод в течение последних нескольких лет активно применяется и уже зарекомендовал себя как надежный способ для изучения приповерхностной части ледников, в частности, обнаружения в них трещин, пустот и прочих неоднородностей [Arcone, Delaney, 2000; Grigoreva и др., 2019; Lavrentiev и др., 2015; Nath, Vaughan, 2003; Попов и др., 2016; Попов и др., 2017; Taurisano и др., 2006; Владов, Старовойтов, 2004; Лаврентьев и др., 2014]. Электромагнитные методы на протяжении многих лет успешно применяются для изучения снежно-фирновой толщи и ледников Антарктиды и Арктических регионов [Попов и др., 2019; Zamora и др., 2007; Богородский В. В., 1983; Мачерет Ю.Я., 2006], при изучении горных ледников, включая погребенные льды [Kutuzov и др., 2019]. Однако работ по применению георадара как экспрессного метода оценки мощности сезонных снежных отложений мало, хотя актуальность данных исследований в свете изучения климатических изменений, оценки лавиноопасности склонов и т.д., очевидна. В июне 2018 года были выполнены опытно-методические работы, которые подтвердили надежность метода георадиолокации в гляциологических изысканиях, что позволило провести полноценные работы по оценке сезонного снегонакопления в июне 2019 г.

Актуальность работы заключается в том, что на данный момент основным методом изучения сезонного снегонакопления в пределах ледника Джанкуат является ручная

снегомерная съёмка. Такой способ требует затрат огромного количества времени и сил, а также является не самым точным в случаях, когда за подошву снега принимается посторонний объект в толще. В качестве альтернативы в данной работе предлагается исследовать мощность сезонных осадков с помощью георадара. Применение данного метода не только значительно ускорит и упростит изучение снежных отложений на леднике, но и позволит избежать ошибок в определении подошвы снега. Ручная снегомерная съёмка в этом случае может проводиться в гораздо меньших объёмах в целях проверки данных георадиолокации. В рамках исследования были поставлены следующие цели и задачи:

Цель работы

- Составление карты мощности сезонного снегонакопления на леднике Джанкуат по данным снегомерных работ за 2018-2019 гг. с использованием георадара

Задачи работы:

- Выполнение полевых работ: георадиолокационная съёмка и сопутствующие топогеодезические работы на леднике Джанкуат в июне 2019 г.;
- Привязка навигационных данных в программе «Gaea», обработка радарограмм в программе «Geoscan32» и «Gaea»;
- Выделение границ различных сред на радарограммах и последующая их оцифровка в программе «Gaea»;
- Построение карт в программе «Surfer12»;
- Анализ и интерпретация полученных результатов.

Глава 1. Основы метода георадиолокации

Принцип действия

Принцип действия аппаратуры подповерхностного радиолокационного зондирования (в общепринятой терминологии - георадара) основан на излучении сверхширокополосных (наносекундных) импульсов метрового и дециметрового диапазона электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства. Такими границами раздела в исследуемых средах являются, например, контакты между влагонасыщенными и сухими грунтами, между талыми и мерзлыми грунтами, между осадочными и коренными породами, а также контакты между породами различного литологического состава, между материалом искусственного сооружения и породой, и т. д. [Владов, Старовойтов, 2004]. В подповерхностной георадиолокации распространение электромагнитных волн метрового и дециметрового диапазона в геологической среде-диэлектрике описывается уравнениями Максвелла:

$$1. \oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

$$2. \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

$$3. \oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}.$$

$$4. \oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV.$$

Единство структуры данных

При входе в среду испускается электромагнитный импульс $f_0(t)$, а на выходе среды приемная антенна регистрирует отклик среды – совокупность волн, которые отличаются друг от друга интенсивностью, временами пробега, и формой. Информация о среде содержится в кинематических и динамических характеристиках этих волн. Для георадиолокации это двойные времена пробега электромагнитных волн до границы раздела сред с различной диэлектрической проницаемостью, информация о дисперсии фазовых скоростей в среде и информация о потерях, связанных с токами проводимости.

Длины волн и затухание, глубинность и разрешающая способность.

В методе георадиолокации длины волн в геологической среде лежат в пределах от первых сантиметров до 2 метров, в ее основном диапазоне частот от 50 до 3000 МГц. Потери за счет токов проводимости и расхождение сферического фронта волны определяет затухание и, например, для песчаноглинистого разреза с удельным электрическим сопротивлением не ниже 100 Ом*м может доходить до 15 Дб/м.

Глубинность исследований на самых низких частотах, в среднем, не превышает 10-15м. При этом разрешающая способность не хуже половины длины волны, то есть лежит в пределах от 1 сантиметра до 1 метра. Таким образом, разрешающая способность георадиолокации значительно лучше, чем в методе сейсморазведки. С помощью георадара можно решать многие задачи, например, локализации мелких и замкнутых неоднородностей, что недоступно сейсморазведке.

Скорости распространения волн.

Скорость распространения волн в среде является основным параметром, определяющим кинематику полей в волновых методах. В георадиолокации при допущении о малости потерь в среде скорость распространения электромагнитных импульсов V напрямую связана с действительной частью относительной комплексной диэлектрической проницаемости среды:

$$V = c/\sqrt{\varepsilon},$$

где c - скорость света в вакууме, ε - действительная часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости среды. Контраст ε в слоях определяет отражательную способность границ и вместе с линейными размерами поверхности локальных объектов, отнесенными к длине волны, определяет способность объектов к образованию дифрагированных волн.

Причины наличия в среде контрастов диэлектрической проницаемости.

В приповерхностной части разреза эффективная диэлектрическая проницаемость трехкомпонентной среды (воздух, вода, минеральные зерна) определяется пропорцией этих компонент, для которых диэлектрическая проницаемость равна соответственно 1, 81 и 6-9. Таким образом, значения основных параметров в среде определяются следующими свойствами: структурой, текстурой пород, их обводненностью, которые, в свою очередь, связаны с литологией, степенью нарушенности, пористостью (пустотностью) и другими причинами, имеющими природное или техногенное происхождение.

Электрофизические свойства горных пород

Наиболее важными параметрами, характеризующими возможности применения метода георадиолокации в различных средах, являются удельное затухание и скорость распространения электромагнитных волн в среде, которые определяются ее

электрическими свойствами. Первый из них определяет глубинность зондирования используемого георадара, знание второго параметра необходимо для пересчета временной задержки отраженного импульса в глубину до отражающей границы. 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:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'',$$

где ϵ - комплексная относительная проницаемость, ϵ' - действительная часть, связанная с поляризацией диэлектрика под действием приложенного поля, а ϵ'' - мнимая часть, связанная с конечной проводимостью диэлектрика (в Ом/м):

$$\sigma = \omega\epsilon''\epsilon_0,$$

где ω - частота приложенного электромагнитного поля.

Диэлектрические потери характеризуются тангенсом угла - отношением мнимой и действительной частей относительной диэлектрической проницаемости:

$$\operatorname{tg} \delta = \epsilon'' / \epsilon' = \sigma / \omega\epsilon'\epsilon_0.$$

Скорость распространения электромагнитной волны в диэлектрике зависит от его диэлектрической и магнитной проницаемостей, однако, для большинства горных пород значение магнитной проницаемости близко к 1 и не зависит от частоты поля. С учетом этого, фазовая скорость распространения волны будет:

$V = c / \operatorname{Re}\sqrt{\epsilon} = c / \sqrt{\epsilon'}$, где c - скорость распространения электромагнитных волн в вакууме. Это одно из наиболее важных для радарных исследований соотношение, поскольку V - измеряемая величина, а ϵ' - свойство вещества [Владов, Старовойтов, 2004].

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} секунды 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} секунды. Так, например, для воды время поляризации составляет 10^{-11} секунды и ее диэлектрическая проницаемость не меняется до частот порядка 10^{10} герц. Для льда $\tau \approx 10^{-5}$

с и для частот выше 108 Гц диэлектрическая проницаемость практически не зависит от частоты.

Среда	Относительная диэлектрическая проницаемость	Удельное затухание, дБ/м	Скорость распространения волн, м/с
Воздух	1	0	0,300
Песок влажный	20 — 30	0,5 — 5	0,055 — 0,067
Песок сухой	4 — 6	0,01 — 1,5	0,122 — 0,150
Суглинок влажный	10 — 20		0,067 — 0,095
Суглинок сухой	4 — 6		0,122 — 0,150
Глина влажная	19 — 27	25 — 110	0,058 — 0,069
Глина сухая	2 — 7	3 — 14	0,113 — 0,212
Торф	50 — 78		0,034 — 0,042
Ил	13 — 27		0,058 — 0,083
Гранит	9		0,100
Бетон сухой	3 — 7	1 — 7	0,090 — 0,113
Асфальт сухой	3 — 6	2 — 15	0,122 — 0,173
Пресный лёд	4	0,1 — 3,5	0,150
Пресная вода	81	0,10	0,033

Рисунок 1. Электрофизические параметры некоторых сред [Владов, Старовойтов, 2004]

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.

Отражение, преломление, дифракция и затухание электромагнитных волн в реальных средах.

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.

Отражение электромагнитных волн.

Коэффициент отражения при нормальном падении волны на границу двух слоев 1 и 2 с различной диэлектрической проницаемостью будет: ϵ'

$$K_{\text{отр}} = (\sqrt{\epsilon_1'} - \sqrt{\epsilon_2'}) / (\sqrt{\epsilon_1'} + \sqrt{\epsilon_2'}) .$$

Преломление электромагнитных волн.

Коэффициент преломления (прохождения через границу) будет равен:

$K_{\text{пр}} = 1 - K_{\text{отр}} = 2 \sqrt{\epsilon_2'} / (\sqrt{\epsilon_1'} + \sqrt{\epsilon_2'})$. При двукратном прохождении через границу, например, при отражении от более глубокой границы, суммарное уменьшение амплитуды сигнала будет равно $1 - K_{\text{отр}}^2$

Дифракция электромагнитных волн.

Это явление возникает в том случае, когда электромагнитными волнами облучается отражающий объект, размеры которого меньше преобладающей длины волны. Математическое описание процесса дифракции чрезвычайно сложно. 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 [Владов, Старовойтов, 2004]. С помощью таких ПО как «GeoScan» или «Gaea» можно производить подбор значений эpsilon по дифрагированным объектам (рис. 2)

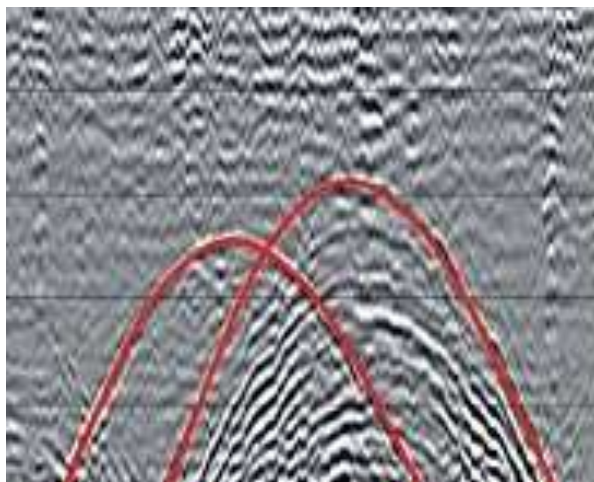


Рисунок 2. Фрагмент радарограммы с выделенными дифракциями от точечных объектов

Затухание электромагнитных волн.

Под затуханием чаще всего понимают общее уменьшение амплитуды зондирующего сигнала при прохождении его через среду до отражающей границы и обратно к приемнику. Факторами, вызывающими уменьшение амплитуды, являются следующие:

- отражение и преломление на промежуточных границах (рассмотрено выше);
- потери, связанные с проводимостью среды (рассмотрено выше);
- геометрическое расхождение фронта волны.

Круг задач, решаемых с помощью радара

Все задачи, решаемые с помощью георадара, могут быть разделены на две большие группы с характерными для каждой группы методиками исследований, способами обработки, типами отображения объектов исследования в поле электромагнитных волн и представлениями результата.

Геологические, инженерно-геологические и гидрогеологические задачи

а) картирование геологических структур - восстановление геометрии относительно протяженных границ, поверхности коренных пород под рыхлыми осадками, уровня грунтовых вод, границ между слоями с различной степенью водонасыщения, поиск месторождений строительных материалов;

б) определение свойств различных отложений по скорости распространения электромагнитных волн, опираясь на связь этих свойств с диэлектрической проницаемостью пород;

в) определение толщины ледяного покрова;

г) определение мощности водного слоя и картирование поддонных отложений;

д) определение мощности зоны сезонного промерзания, оконтуривание областей вечной мерзлоты, таликов;

Поиск локальных объектов, обследование инженерных сооружений, нарушения штатной ситуации

а) трубопроводов;

б) кабелей;

в) участков разреза с нарушенным естественным залеганием грунта - рекультивированных земель, засыпанных выемок;

г) погребенных отходов и захоронений;

д) подземных выработок, подвалов, карстовых и суффозионных провалов;

е) границ распространения углеводородных загрязнений;

ж) поиск скрытых нарушений в стенах наземных сооружений, шахт, тоннелей, в опорах и перекрытиях;

з) поиск нарушений, возникших в процессе строительства или в процессе эксплуатации в конструкции автомобильных и железных дорог, взлётно-посадочных полос аэродромов и т.д.

Комплект и устройство георадара:

Антенный блок (АБ) включает в себя системы обработки информации, приёмо-передающие антенны, приемные и передающие устройства. Разрешающая способность георадара и глубина зондирования определяется типом антенного блока. Для выполнения различных задач георадар может комплектоваться несколькими антенными блоками.

Уменьшить массу, стоимость и габариты комплекта георадара позволяет применение карманного компьютера. В этом компьютере есть экран, на котором можно выбрать все требуемые настройки.

Блоки питания (БП), используются для питания антенного блока и блока управления, в них применяются герметичные батареи никель-металлогидридных и свинцовых аккумуляторов с напряжением 12В.

Для перемещения георадара служит выдвигающаяся телескопическая штанга.

Измеритель пути (ИП), позволяет определять расстояние на пересеченной местности или на воде, обычно он представлен колесом с известной длиной окружности.

Датчик перемещения (ДП), позволяет осуществлять точную привязку по расстоянию на местности.

Соединительные оптические кабели, служат для передачи информации и сигналов и позволяют повысить качество радиолокационного сигнала.

Радиомодем, позволяет производить дистанционное управление прибором и осуществлять съём информации с антенных блоков в радиусе до 100 метров.



Рисунок 3. Вид и комплектация георадара "Око-2" [Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар), 2009]

Приёмное устройство

Приемное устройство позволяет получить сигнал, отправленный излучающей антенной. Оно выполняется, как правило, по схеме стробоскопического преобразователя с коэффициентом преобразования временного масштаба порядка 10000 и обеспечивающего трансформацию принятых сигналов в область звуковых частот. Помимо этого, приемный тракт включает в себя широкополосный усилитель с временной автоматической регулировкой усиления (ВАРУ). Наличие ВАРУ обеспечивает сжатие динамического диапазона входных сигналов. Блок излучения и приема осуществляет формирование зондирующего сигнала на излучающей антенне, также осуществляет прием сигнала с приемной антенны, стробоскопическую обработку, запись в память компьютера и визуализацию на экране монитора. Всем процессом выполнения зондирования с регулируемыми параметрами задержек сигнала (если необходимо), интервала времени регистрации (развертки), коэффициента усиления, программируемого переменного во

времени усиления и фильтрации сигнала, управляет компьютер с помощью соответствующей программы сбора и хранения информации [Владов, Старовойтов, 2004].

Однозначно, важнейшим элементом георадара являются антенны. По назначению антенны делятся на излучающие, приемные и приемно-излучающие. В георадиолокации для излучения и приема используются две одинаковые антенны (бистатическая антенна), либо одна и та же антенна работает сначала в качестве излучающей, а потом в качестве приемной (моностатическая антенна). По принципу действия антенны, применяемые в георадиолокации, подразделяются на дипольные, щелевые и рупорные. С помощью них георадар отправляет сигнал в виде электромагнитной волны, а потом и принимает эту же волну, но уже отраженную от объекта в недрах.

Глава 2. Физико-географический очерк

Ледник Джанкуат находится на северном северо-восточном склоне Главного Кавказа, в верховьях реки Адыл-су, Кабардино-Балкария. Координаты ледника: 43°11'02" северной широты, 42°44'41" восточной долготы, высота над уровнем моря – от 2200 м до 4100 м. Его название с балкарского переводится, как «мощный крайний ледник». Талые воды ледника питают реку Адыл-су, длиной в 12 км, которая, в свою очередь впадает в р. Баксан, у ее устья на правом берегу еще с советских времен расположен одноименный альплагерь. От устья Адыл-су на противоположном берегу в долине Баксанского ущелья расположен посёлок Эльбрус – административный центр сельского поселения «Эльбрус», с населением более 3000 человек, у подножия ледника. Рельеф сильно расчлененный, имеется большое количество рек и временных протоков.

Работы выполнялись на высотах вплоть до 4100 м над уровнем моря. В верховьях реки Адыл-су расположена гляциологическая станция МГУ «Джантуган», которая являлась опорным лагерем во время работ 2018-2019 года. Высота, на которой расположен лагерь, составляет 2230 м. В окрестностях лагеря из растительности можно встретить карликовую березу и другие низкорослые деревья, также различные мхи, лишайники и травы. Из животных распространены горные козлы, туры, горностаи, полевые мыши. На рис. 4 изображена обзорная карта участка. Инфраструктура в районе проведения работ развита слабо. Обустроенная и пригодная для проезда дорога к леднику отсутствует. Ближайшее расстояние до населенного пункта (поселок Эльбрус) 15 км. Добраться до гляциологической станции МГУ можно лишь пешком по горной тропе, либо на вертолете. Расстояние от Тырныауза до поселка Эльбрус составляет 35 км, продолжительность пути на автомобиле составляет 40 минут.

Климат в этом районе умеренный континентальный, влажный. Средние температуры января в высокогорьях составляют около -11°C, июля – 20-25°C. В среднем за год выпадает до 1000 мм осадков, в высокогорьях доля летних осадков составляет 20-30%, мощность снежного покрова на северных склонах 3-4 м, в ветровой тени может достигать 12 м.

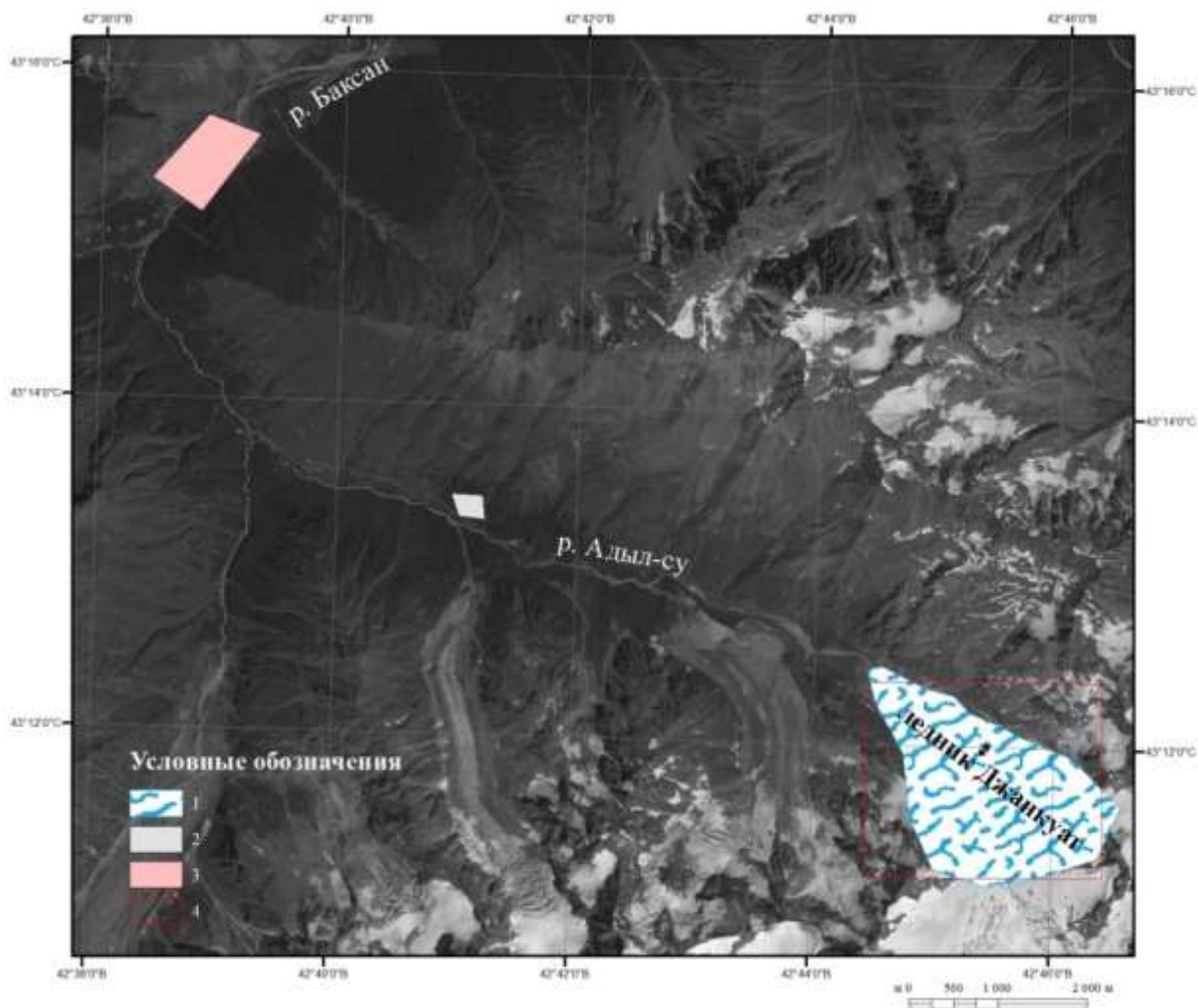


Рисунок 4. Обзорная карта участка работ

Условные обозначения: 1-Ледник Джанкуат, 2-альплагерь «Джантуган», 3-поселок Эльбрус, 4-участок проведения георадиолокационных работ.

Глава 3. Геофизическая изученность ледника

История изучения ледника геофизическими методами.

В 1950–60е годы основным и наиболее точным способом получения данных о толщине и объёме ледников были методы отражённых и преломлённых волн [Алёшин А.С., 1972; Алёшин А.С. и др., 1972; Б.Л. и др., 1970; Василенко Е.В. и др., 2003; Голубев Г.Н. и др., 1970; Лаврентьев и др., 2014; Мачерет Ю.Я., 1977; Мачерет Ю.Я., 2006; Суханов Л.А., 1974]. Через некоторое время стали использовать радиолокационный метод, который позволял проводить измерения толщины льда с большей точностью (2-3%). Также преимуществом георадиолокации явилась возможность проведения работ как в пеших маршрутах, так и с наземного или воздушного транспорта. Первые работы по радиолокационному измерению толщины льда на Кавказе проведены в конце 1960х – начале 1970х годов на леднике Джанкуат [Василенко Е.В. и др., 2003; Мачерет Ю.Я., 2006].

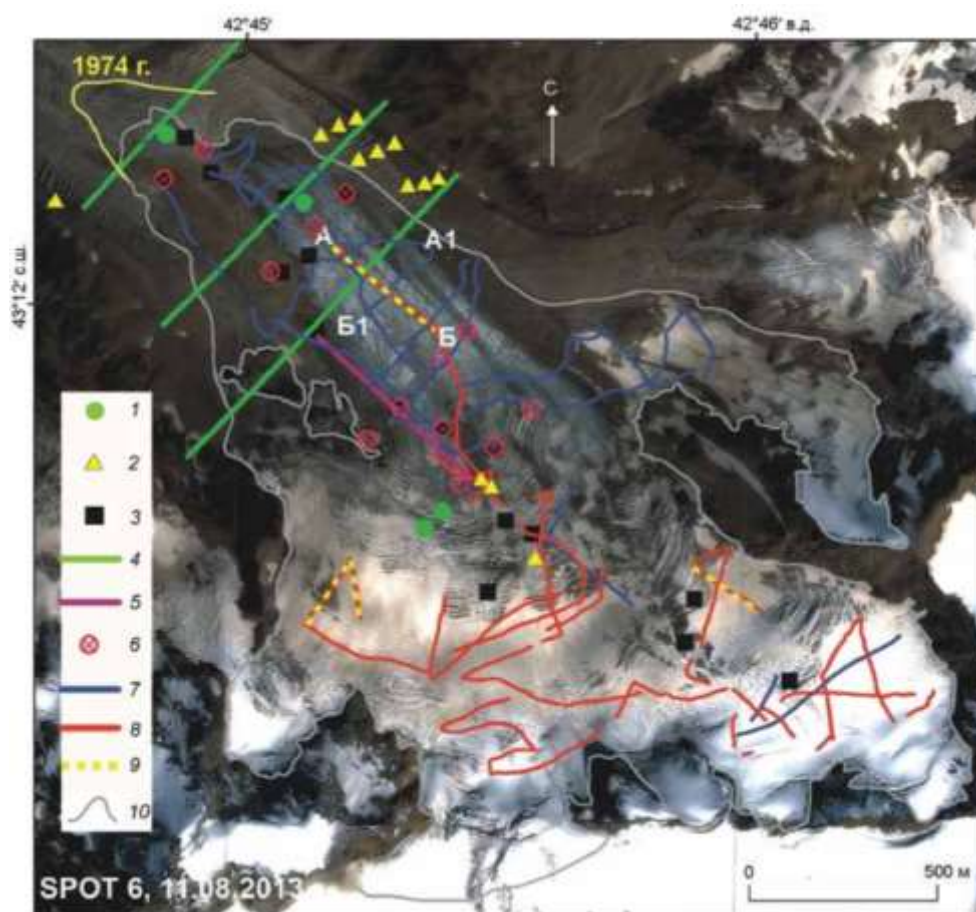


Рисунок 5. Пункты и маршруты геофизических исследований на леднике Джанкуат в 1960–70х годах и 2012–2013гг.: 1 – точки ВИЗ; 2– точки ВЭЗ; 3– точки термоэлектробурения; 4– профили гравиметрических измерений; 5– профили радиолокационных измерений 1974г.; 6– точки радиолокационных измерений 1974г.; 7, 8– профили современного радиозондирования; 9– участки профилей с двойным отражением от ложа; 10– контур ледника на 2013г. [Лаврентьев и др., 2014]

Исследования 1960–70-х годов

В конце 1960х– начале 1970х годов для изучения внутреннего строения и толщины ледника Джанкуат и ледниковых отложений был применён комплекс геофизических методов, в состав которого входили гравиметрические и сейсмометрические исследования, вертикальное индукционное и электроразведочное зондирование, термоэлектробурение, а также радиолокационное зондирование [Берри Б.Л. и др., 1970]. Рассмотрим те из них, по результатам которых была построена первая карта толщины льда (рис. 5)

Гравиметрия.

В 1968г методом гравиметрии проводились измерения толщины льда в 100 точках по одному продольному и шести поперечным профилям используя гравиметры ГАК-7. Измеренная толщина ледника Джанкуат вдоль этих профилей (рис. 4) оказалась равной 40–50 м в нижней части ледника, и до 80–100 м в средней части, что в целом, с учётом среднеквадратической ошибки определения мощности льда вдоль каждого из профилей $\pm 7-8$ м, согласуется с данными термобурения в этой же части ледника [Берри Б.Л. и др., 1970; Голубев Г.Н. и др., 1970; Лаврентьев и др., 2014]

Сейсмометрические измерения.

В 1970 г. проводились измерения толщины льда методом сейсмометрии по четырем профилям, протяженность каждого из которых составила 62м. Профили располагались в нижнем и верхнем цирках, также на границе питания и на языке ледника. Для измерений применяли портативную одноканальную сейсмическую установку ОСУ-1 с фоторегистрацией и индикацией волновой картины на экране электроннолучевой трубки. В результате работ получили надёжные отражения с глубин 56 и 22 м только в одной точке в верхней части языка [Алёшин А.С., 1972].

Вертикальное индукционное зондирование

Вертикальное индукционное зондирование позволяет исследовать в стационарном режиме структуру электромагнитных волн, длина которых соизмерима с геометрическими размерами установки и изучаемого разреза. С помощью такого зондирования можно определить мощность первого слоя, т.е. ледника, удельное электрическое сопротивление основания, а соответственно, и тип подстилающих пород по причине того, что собственно ледник характеризуется очень большим удельным электрическим сопротивлением (сотни мегаомметров), а подстилающие породы – малым (первые килоомметры), с помощью такого зондирования можно определить мощность первого слоя, т.е. ледника, удельное электрическое сопротивление основания, а соответственно, и тип подстилающих пород. В

1968г. вертикальное индукционное зондирование было выполнено в нескольких точках на леднике, и измеренные на языке мощности льда (45–75м) оказались максимально близкими к данным бурения в этой области [Берри Б.Л. и др., 1970].

Радиолокационное зондирование.

В 1974 г. под руководством Л. А. Суханова проведено радиолокационное зондирование в точках вдоль нескольких профилей, расположенных в нижней части ледника (рис. 4). Для этого на базе радиовысотомера РВ10, работающего в подходящем для измерений на леднике частотном диапазоне 20–500МГц, была разработана и изготовлена радиолокационная установка «РИМ» (радиолокационный измеритель мощности), позволяющая вести автоматическую запись большого количества реализаций эхосигнала на бумажную ленту во всём диапазоне изменений их уровня и времени прихода. Полученные серии реализаций эхосигналов подвергались статистической обработке с целью выделения эхосигнала от ложа из отражений от неоднородностей и выявления положения отражающей границы «ледник–ложе». Точность определения толщины льда по данному методу зависит от выбора интервала дискретности построения кривых. Метод обработки сигналов заключается в определении частоты попадания вершин импульсов эхосигнала в узкие интервалы времени и построении для каждой точки зондирования кривых распределения вероятностей. Это существенно влияло на точность измерений, а в настоящее время не позволяет сравнивать эти данные с результатами, полученными с помощью локатора с цифровой регистрацией данных [Алёшин А.С. и др., 1972; Василенко Е.В. и др., 2003; Мачерет Ю.Я., 2006].

Термоэлектробурение.

Термоэлектробурение было выполнено в нескольких точках основных высотных зон ледника Джанкуат (рис. 4). Для бурения использовались экспериментальные термоэлектробуры «Электроигла» конструкции В. А. Морева и бур «Микротэб», разработанный Л. А. Сухановым [Суханов Л.А., 1974]. Результаты бурения как наиболее точного метода определения толщины ледника использовались для проверки данных, полученных рассмотренными ранее методами. Таким образом, по данным радиозондирования была установлена глубина ложа, значения которой совпали с определённой по данным бурения в пяти точках из шести со средним расхождением ± 4 м. При корреляции данных бурения с результатами, полученными другими геофизическими методами, выявлены расхождения в пределах 20м. Причиной большинства различий в измеренных значениях толщины льда стало неодинаковое расположение точек и профилей

измерений. На основании выполненных измерений толщины ледника, а также её расчётов по соотношению между скоростью движения и толщиной ледника методом геоморфологического профилирования была построена карта толщины ледника [Суханов Л.А., 1974].

Глава 4. Георадарные исследования мощности сезонных осадков

4.1 Методика выполнения работ

Работы выполнялись отечественным георадаром ОКО-2 (ООО «Логистические системы», Россия) с экранированным антенным блоком АБ-400 (частота зондирующих импульсов 400 МГц) и георадаром Zond-12e (Radar Systems, Inc, Латвия) с набором раздвижных антенн (38-75-150 МГц) и с антенным блоком АБ-900 (рис. 6).



Рисунок 6. Георадиолокационная съемка: а - георадар ОКО-2 с антенным блоком АБ-400; б – георадар Zond-12e с антенным блоком АБ-900; в - георадар Zond-12e с раздвижными антеннами.

... линиям рельефа, расстояние между ними составляло около 40 м. Общая длина профилей – 12 км (рис. 7). Отклонение георадарных маршрутов от прямых линий профиля или отклонение от выбранного масштаба съёмки (пропуск отдельных профилей или частично отснятый профиль) связано со сложно проходными участками и отсутствием возможности проведения съёмки. Плановая привязка осуществлялась преимущественно с помощью спутникового приёмника Garmin GPSMap 64 (Garmin Ltd., Taiwan), на отдельных участках – с использованием DGPS-приемников EFT-M2 (ООО «Эффективные технологии», Россия). После проведения ряда методических работ отказались от использования колеса в качестве измерителя пути, как предписано инструкцией [Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар), 2009], в связи с налипанием снега и проскальзыванием колеса. На склонах с

уклонами более 20 градусов, георадар приходилось транспортировать на растяжках, что также исключало использование колеса.

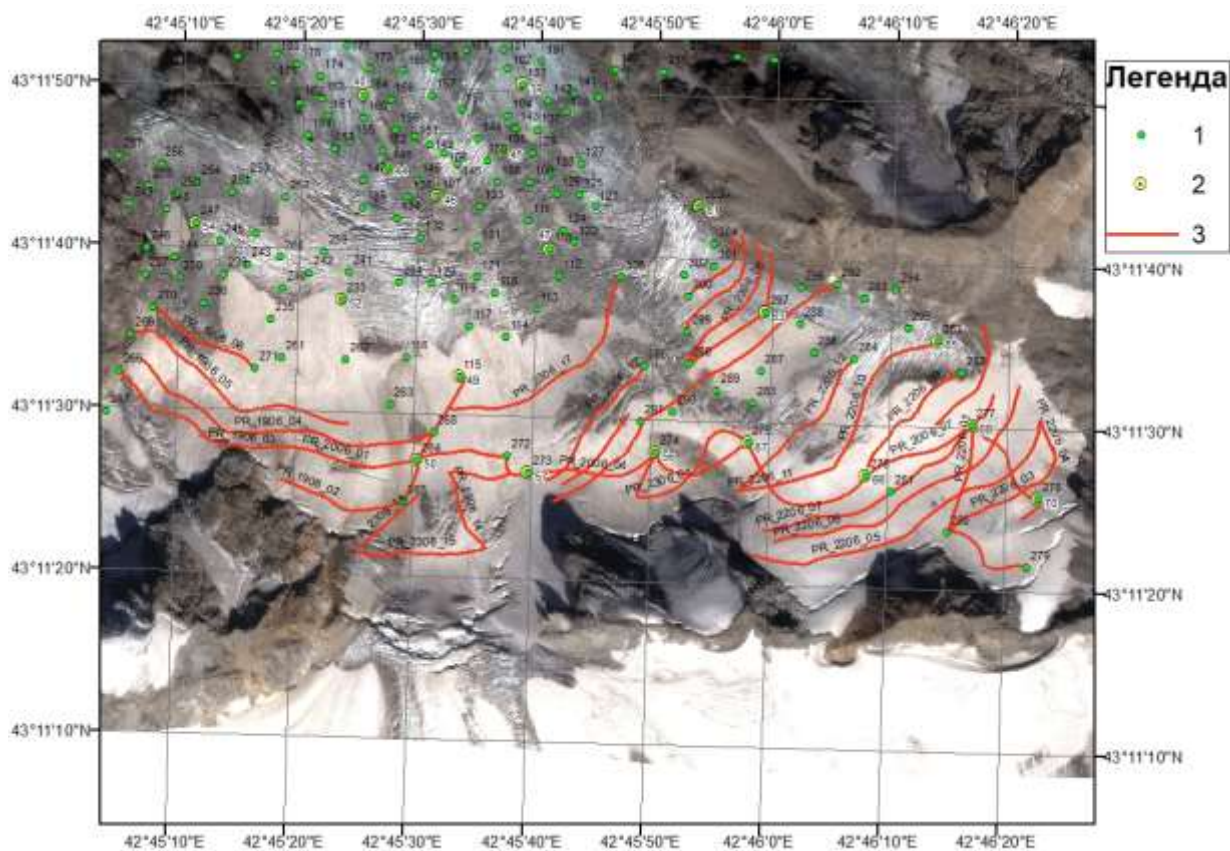


Рисунок 7. Общий вид сети профилей и опорных пунктов (1-пункты снегомерных работ; 2-пункты бурения; 3-сеть профилей)

Одновременно с георадарной съемкой были заложены и задокументированы опорные шурфы и точки снегомерных работ с применением металлических зондов, что явилось основой для создания наиболее точной скоростной модели лоцируемой среды. Все прочие методы ее построения, в частности, по результатам зондирований по методике общей глубинной (срединной) точки (ОГТ/ОСТ) или по годографам дифрагированных волн [Роров и др., 2017; Богородский В. В., 1983; Владов, Старовойтов, 2004], уступают по качеству и не всегда применимы. На рисунке приведено сравнение фрагмента временного разреза (PR_1906_01) и стратиграфической колонки полученной при описании шурфа (рис. 8).

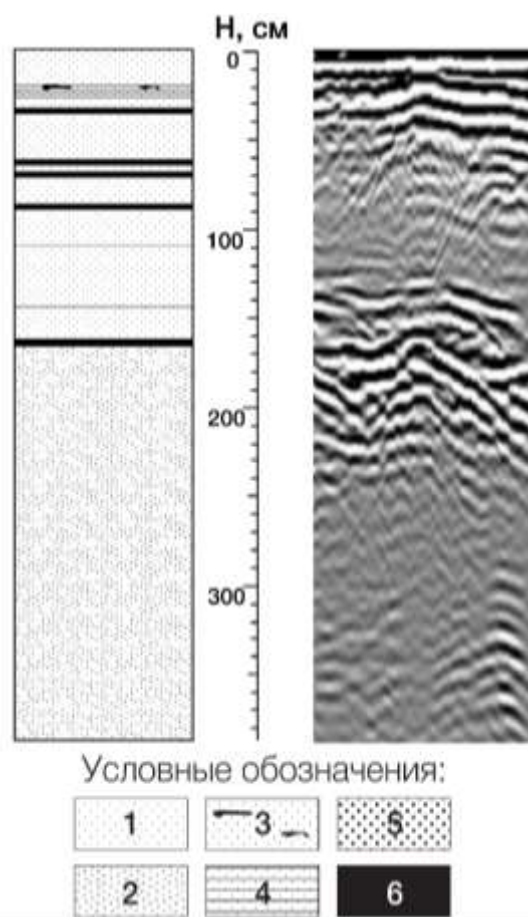


Рисунок 8. Сравнение фрагмента временного разреза и стратиграфической колонки полученной при описании шурфа, где 1 - Мелкозернистый снег (МЗС, $\varnothing < 1$ мм); 2 - Среднезернистый снег (СЗС, $1 \text{ мм} < \varnothing < 3$ мм); 3 - МЗС с ледяными включениями; 4- МЗС с тонкими ледяными прослоями; 5 - Крупнозернистый снег (КЗС, $\varnothing > 3$ мм); 6 – ледяные слои.

4.2. Методика обработки данных

Обработка полевых материалов выполнялась согласно следующему графу:

1. Предварительная обработка: ввод координат, усиление сигнала, фильтрация;
2. Пересчет временных разрезов в глубинные и оцифровка целевых границ;
3. Построение гридов мощности снега;
4. Оформление карт мощности снега.

В ходе проведения полевых работ для каждого маршрута были получены сетки георадиолокационных разрезов, проинтерпретировав данные с которых, необходимо было получить информацию о глубине залегания границы снега со льдом или, в некоторых случаях с породами, подстилающими ледник. После чего, сопоставив данные с разрезов и навигационные данные для каждого конкретного профиля, были построены гриды мощности зимних осадков для каждого исследованного участка ледника. Обработка

данных георадиолокации осуществлялась с использованием авторского ПО «GAEA» (автор – С.В. Попов).

Первый этап, в первую очередь, включал в себя ввод координат. Было необходимо сопоставить разрезы с их положением на карте, используя для этого координаты точек начала и конца профилей с GPS-навигатора. В случае необходимости, полезный сигнал подчёркивался при помощи фильтрации и изменения профиля усиления.

В нашем случае граница снега и льда является самой верхней границей на разрезах, и в большинстве случаев она является единственной прослеживаемой границей (рис. 9). В ходе оцифровки снежная толща на каждом разрезе была проведена отдельным слоем, после чего программа автоматически пересчитывала разрезы в глубинные значения при подстановке нужной величины ϵ . В среднем для снега эта величина составляет около 2.7, но, исходя из влажности снежных покровов во время проведения работ, в нашем случае, с помощью дифрагированных волн и опираясь на данные ручных снегомерных работ диэлектрическая проницаемость была выбрана $\epsilon=3$ [Котляков и др., 2017; Мачерет Ю.Я., 2006]. Стоит отметить, что в районе проведения работ присутствует шурф, в котором точно известна мощность снежных осадков. Значения толщины снежного покрова возле шурфа, полученные с разрезов при $\epsilon=3$, отличаются от глубины шурфа примерно на 7 см. После оцифровки для каждого разреза получены таблицы данных о координатах и глубине залегания, интересующей нас границы в каждой точке профиля.

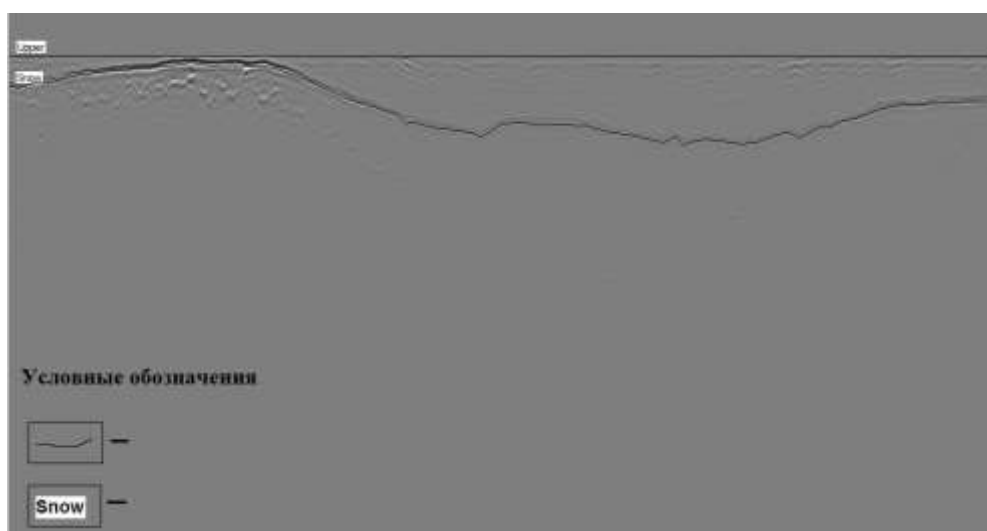


Рисунок 9. Георадиолокационный разрез вдоль профиля pr-2906-1 с оцифрованными границами. Условные обозначения: 1-граница оцифрованного слоя, 2-наименование слоя.

Следующим этапом обработки материалов было создание гридов мощности снега для исследованных участков ледника. Для этого использовалось ПО Surfer12 (Golden Software). Размер ячейки грида для всех участков работ составил 10x10 м.

После создания гридов для каждого отдельного участка была построена карта мощности сезонного снега (рис. 10)

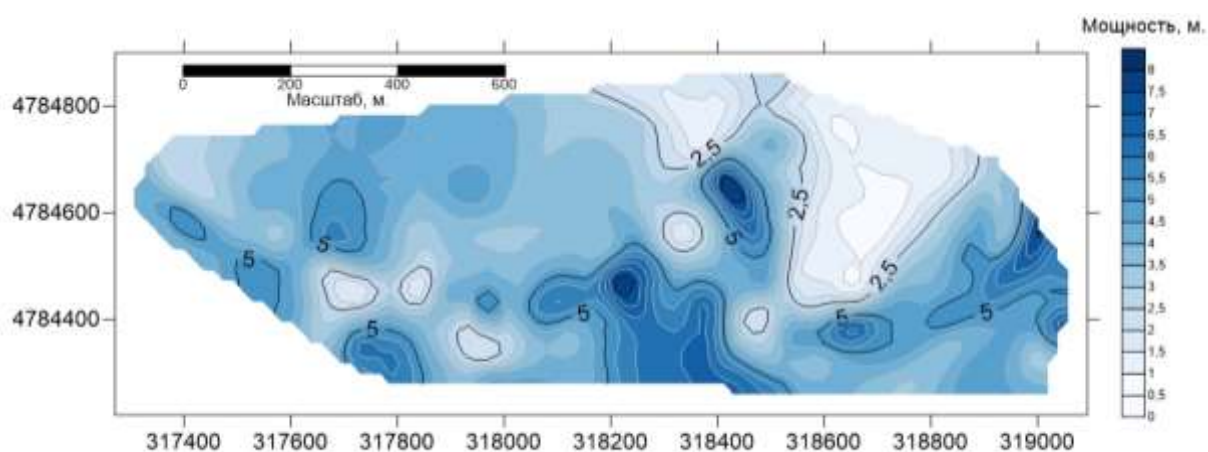


Рисунок 10. Карта мощности сезонного снега по данным георадиолокации за 2019 год

Глава 5. Результаты

Таким образом, в результате работ была построена карта мощности сезонного снега с наложением точек бурения, точек ручной снегомерной съемки и профилей (рис. 11). По данной карте можно судить о зонах наибольшего сезонного снегонакопления, что в свою очередь позволяет провести корреляцию с расположением понижений рельефа фирнового покрова или наличием крупных трещин. Действительно, в юго-западной части ледника (профили PR_1906_01 - PR_1906_04) мощность снега достигает 6-8 метров, что связано с расположением этой зоны вблизи резких лавиноопасных склонов и ледопадов. Также, наблюдаются еще две зоны высоких значений мощности снега (до 9 метров). Одна из них расположена между 56 и 57 точками бурения, а вторая между 289 и 299 точками ручных снегомерных работ, обе эти зоны соответствуют крупным трещинам, имеющим ширину до 4-5 метров в центральных частях. Обильное накопление сезонных снежных осадков вблизи 66 и 68 точек бурения (профили PR_2206_03 – PR_2206_07) связано с близким расположением к перевалу, и активным выдуванием снега с Джантуганского плато.

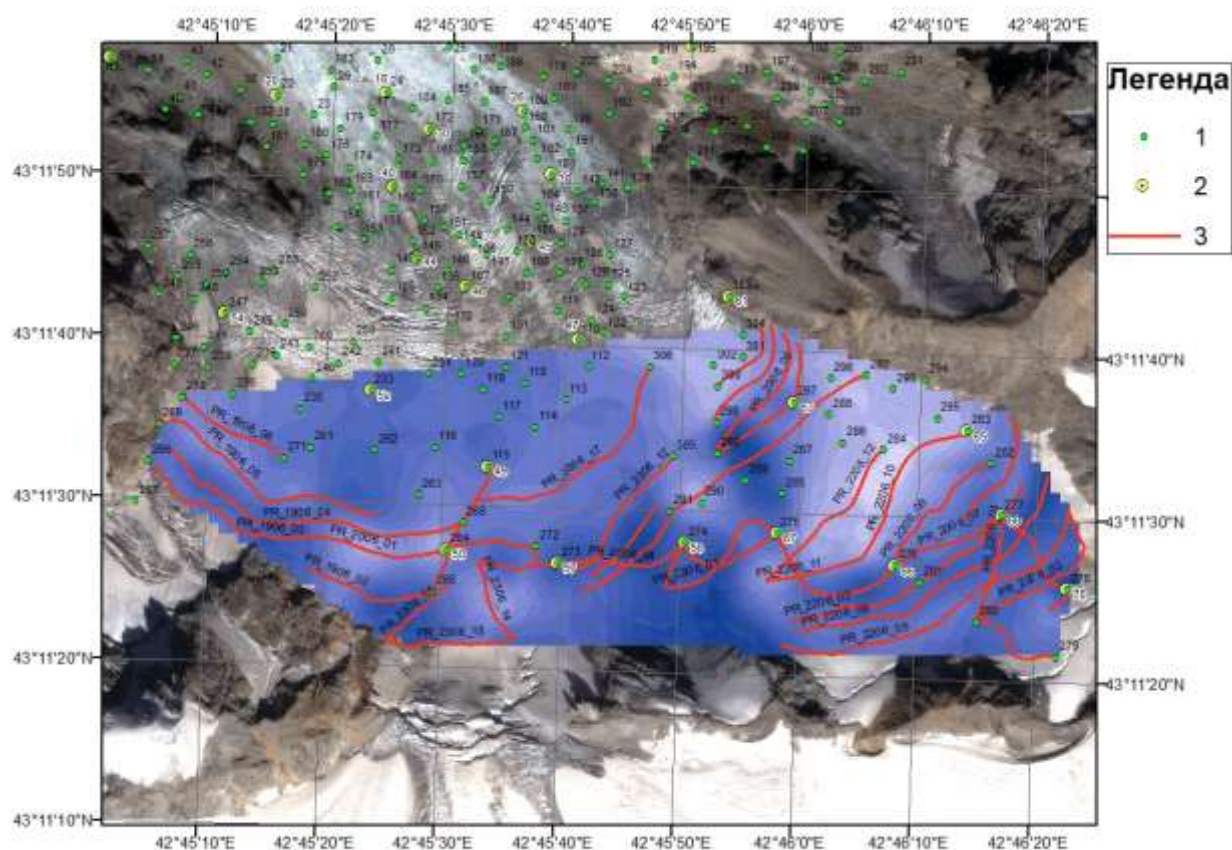


Рисунок 11. Карта мощности сезонного снега. пунктов (1-пункты снегомерных работ; 2-пункты бурения; 3-сеть профилей)

По итогу работ, в результате анализа расхождений значений мощности снега, определенных по шурфам или методом ручных снегомерных работ и методом георадиолокации можно с уверенностью сказать, что использование радара точнее в съемках на площади, так как при обработке разрезов однозначно определяется искомая граница, а объекты, которые могли быть приняты за нее при ручной съемке, исключаются. Помимо этого, применение георадара в исследованиях мощности сезонных отложений затрачивает значительно меньше времени и усилий, что в условиях работ на леднике играет очень большую роль. Вместе с тем необходимо учитывать таяние снежного покрова, которое достигает 20 см в сутки и при длительных измерениях возникнет необходимость введения поправок, которые, в свою очередь приведут к большой погрешности. Также стоит учитывать, что ручная снегомерная съемка позволяет выполнять исключительно точечные измерения, в то время, как с помощью георадиолокационного профилирования проводится площадная съемка. В совокупности эти выводы доказывают, что георадиолокация, как метод оценки сезонных снегонакоплений, является хорошей альтернативой ручной съемке.

Данные, полученные по итогу выполнения данной работы будут использованы сотрудниками кафедры гляциологии МГУ для построения карты аккумуляции снега, сравнения результатов с данными прошлых лет, что имеет большое значение для изучения климатической ситуации данного региона.

Благодарности

В заключении хотел бы поблагодарить Кашкевич Марину Петровну, Григорьеву Светлану Дмитриевну, Попова Сергея Викторовича за помощь на разных этапах работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 18-05-00421-А

«Особенности формирования и развития паводков подледниковых водоёмов Антарктиды»

Список литературы

1. Arcone S.A., Delaney A.J. GPR images of hidden crevasses in Antarctica // Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar. : SPIE, 2000. С. 760–765.
2. Grigoreva S.D. и др. Structure of the near-surface part of the glacier in the Thala Bay area (East Antarctica) based on 2018/2019 ground-penetrating radar survey // Arct. Antarct. Res. 2019. Т. 65. № 2. С. 201–211.
3. Kutuzov S.S. и др. Observations were re-established on Aktru glaciers in Altai // Ice Snow. 2019. Т. 59. № 3. С. 306.
4. Lavrentiev I.I. и др. Ice thickness, volume and subglacial relief of Djankuat Glacier (Central Caucasus) // Ice Snow. 2015. Т. 128. № 4. С. 7.
5. Nath P.C., Vaughan D.G. Subsurface crevasse formation in glaciers and ice sheets // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2003. Т. 108. № B1. С. ECV 7-1-ECV 7-12.
6. Popov S. V. и др. Glaciological and geophysical investigations aimed at organization of a new airfield at the Station Mirny (East Antarctica) // Ice Snow. 2016. Т. 56. № 3. С. 413–426.
7. Popov S. V. и др. Structure of the upper part of the glacier in the area of the designed snow-runway of Mirny Station, East Antarctica (based on the data compiled in 2014/15 field season) // Earth's Cryosph. 2017. Т. 21. № 1. С. 73–84.
8. Popov S. V. и др. Ice sheet dynamics and structure in the area of snow runway at Mirny station, East Antarctica (based on the data collected during the 2016/17 summer and wintering seasons) // Earth's Cryosph. 2019. Т. 23. № 1. С. 80–90.
9. Taurisano A. и др. On the use of ground penetrating radar for detecting and reducing crevasse-hazard in Dronning Maud Land, Antarctica // Cold Reg. Sci. Technol. 2006. Т. 45. № 3. С. 166–177.
10. Zamora R. и др. Crevasse detection in glaciers of southern Chile and Antarctica by means of ground penetrating radar // IAHS-AISH Publ. 2007. № 318. С. 153–162.
11. Алёшин А.С. Опыт сейсмических работ на леднике Джанкуат // МГИ Вып. 20. 1972. С. 213–215.
12. Алёшин А.С. и др. Опыт применения геофизических методов для изучения гидрологических и структурных особенностей ледника Джанкуат // МГИ. 1972. С. 157–163.
13. Берри Б.Л. и др. Опыт применения геофизических методов при изучении ледников Большого Кавказа Джанкуат и Башкара // Тр. ЗАКНИГМИ Вып 45. 1970. С. 182–187.
14. Богородский В. В. Радиогляциология. , 1983.
15. Василенко Е.В. и др. Георадар ВИРЛ для зондирования ледников // МГИ Вып 94. 2003. № 128. С. 225–234.
16. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие. : Изд-во МГУ, 2004. 153 с.
17. Голубев Г.Н. и др. Методика и результаты гравиметрических определений мощности льда горных ледников Джанкуат и Башкара // МГИ Вып. 17. 1970. № 128. С. 72–75.
18. Котляков В.М. и др. Скорость распространения радиоволн в сухом и влажном снежном покрове // Лед и снег. 2017.
19. Лаврентьев И.И. и др. Толщина, объём льда и подлёдный рельеф ледника Джанкуат (Центральный Кавказ) // Лёд и Снег. 2014. № 128.
20. Мачерет Ю.Я. Сейсмический метод в гляциологии // Итоги науки и техники Гляциология. Т. 1. М. изд. ВИНТИ. 1977а. № 128. С. 41–86.
21. Мачерет Ю.Я. Гравиметрический метод в гляциологии // Итоги науки и техники Гляциология. Т. 1. М. изд. ВИНТИ. 1977б. № 128. С. 6–40.
22. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников // М. Научный мир. 2006. С. 389.
23. Суханов Л.А. Измерение мощности горных ледников радиолокационным методом // МГИ Вып. 22. 1974. С. 58–65.
24. Суханов Л.А., Морев В.А., Зотиков И.А. Портативные ледовые термоэлектробуры //

МГИ. Вып. 23. 1974. С. 234–238.

25. Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар). 2009.