

Российская Академия Естествознания
Издательский дом Академии Естествознания

ФГБОУ ВО «Камчатский государственный университет
имени Витуса Беринга»

В.Ю. Павлова, И.Ф. Делемень

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА
ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ
НА КАМЧАТКЕ**

Монография

Москва
2024

УДК 550.3:550.8.01:550.8.08:550.83

ББК 26.20

П12

*Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
ФГБОУ ВО «Камчатский государственный университет
имени Витуса Беринга» (протокол НТС №03 от 26.12.2023 г.)*

Рецензенты:

Паровик Р.И. – доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования физических процессов ФГБУН «Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН», Россия, Камчатский край, с. Паратунка;

Акбашев Р.Р. – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории акустического и радонового мониторинга Камчатского филиала ФГБУН Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», Россия, Камчатский край, г. Петропавловск-Камчатский;

Рылов Е.С. – генеральный директор ООО НИЦ «Геопульс», Россия, Камчатский край, г. Петропавловск-Камчатский.

Павлова В.Ю., Делемень И.Ф.

П12

Применение метода георадиолокации на Камчатке: монография. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2023. – 144 с.

ISBN 978-5-91327-784-8

DOI 10.17513/np.581

Целью исследований является создание научно-методической основы метода георадиолокации применительно к Камчатке, включая методику обработки и интерпретации данных, с учетом практического опыта применения на различных объектах. Для оптимизации метода георадиолокации необходимо сопоставление и анализ результатов геофизических наблюдений в различных геологических условиях. Необходимость такого изучения на Камчатке проявляется в трех важных направлениях: 1) изучение грунтовых условий строительных площадок для обеспечения безопасности при дальнейшем проектировании инфраструктуры в районах с высокой сейсмической активностью; 2) исследование зон разгрузки гидротермальных систем для дальнейшего освоения геотермальных ресурсов; 3) оценка применимости и последующая адаптация метода георадиолокации для изучения вулканических областей и выделения георадарных фаций, затрагивающие процесс рельефообразования.

Монография может быть полезна студентам и преподавателям, аспирантам и научным работникам, которые интересуются вопросами, связанными с применением метода георадиолокации.

Работа выполнена в рамках реализации Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030. Дальний Восток» и при финансовой поддержке научно-исследовательского гранта на тему «Уточнение грунтовых условий и геологического строения территории города Петропавловск-Камчатский с помощью метода георадиолокации».

ISBN 978-5-91327-784-8

© В.Ю. Павлова, И.Ф. Делемень, 2024
© ФГБОУ ВО «КамГУ им. В. Беринга»
© ИД «Академия Естествознания»
© АНО «Академия Естествознания»

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| ГЛАВА I. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ | 10 |
| §1.1. Актуальность и востребованность метода георадиолокации для изучения грунтовых условий при инженерно- геологических изысканиях | 10 |
| §1.2. Применение метода георадиолокации на вулканах. Гидротермальные системы Камчатки и задачи по изучению зоны их разгрузок | 15 |
| ГЛАВА II. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ | 30 |
| §2.1. Методика и аппаратура метода георадиолокации | 30 |
| §2.2. Методика обработки и интерпретации данных радарограмм | 34 |
| ГЛАВА III. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ НА КАМЧАТКЕ | 41 |
| §3.1. Особенности строения осадочной толщи долины реки Авача | 41 |
| §3.2. Изучение обвально-взрывных отложений Авачинского вулкана на берегу бухты Моховая | 46 |
| §3.3. Уточнение оползневой опасности на мысе Чавыча | 54 |
| §3.4. Уточнение инженерно-геологических условий для реконструкции здания на побережье Авачинской губы | 69 |
| §3.5. Уточнение грунтовых условий на Озерновской косе Култучного озера (город Петропавловск-Камчатский) | 72 |
| §3.6. Строение приповерхностной толщи отложений в кальдере вулкана Горелый | 79 |
| §3.7. Некоторые методы дополнительной обработки данных георадиолокации на примере радарограмм, полученных в кратере вулкана Горелый | 84 |
| §3.8. Результаты георадарных исследований на территории Север-Мутновской вулcano-тектонической зоны | 96 |
| §3.9. Изучение пемзовых отложений района горы Тарбаганья на Камчатке с помощью метода георадиолокации | 101 |
| §3.10. Георадарные фации фронтальной части пемзового потока (подножие вулкана Мутновский) | 106 |
| §3.11. Пространственная структура зоны разгрузки на участке Карымшинской гидротермальной системы | 114 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 124 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ | 125 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ | 136 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и востребованность темы. В настоящее время в России уделяется особое внимание необходимости повышения геоэкологической безопасности, устойчивости жилых и производственных комплексов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в сейсмических районах. Исследования, проводимые в рамках этой работы, в определенной мере служат выполнению задач, предусмотренных в Постановлении Правительства РФ (№365, доп. от 14.07.2015) «О федеральной целевой программе «Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в сейсмических районах Российской Федерации на 2016 – 2021 годы»», Приказ от 3 ноября 2017 года N 1501/пр «Об утверждении свода правил «Здания и сооружения в сейсмических районах. Правила обследования последствий землетрясения»».

Определение возможностей применения метода георадиолокации, относящегося к методам малоглубинной геофизики, в сейсмоактивных районах позволит повысить информативность и достоверность результатов, особенно при инженерно-геологических изысканиях для обеспечения сейсмостойкого строительства в геодинамических активных областях, к которым относится Камчатка. Кроме того, в России интерес к освоению геотермальных ресурсов рассматривается как один из путей инвестиционного развития территорий, однако только Камчатка до сих пор остается основным регионом в развитии технологий оценки и прогноза ресурсов подземного тепла. Все это определяет актуальность и востребованность исследований.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологии. Исследования, положенные в основу работы, выполнены по проблеме «Изменение окружающей среды и климата: исследования, мониторинг и прогноз состояния природной среды; природные катастрофы, анализ и оценка природного

риска, вулканизм» и Федеральной целевой программе «Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в сейсмических районах Российской Федерации».

Степень изученности проблемы. Первым опытом применения метода георадиолокации на Камчатке можно назвать исследования И.Ф. Абкадыров, Ю.Ю. Букатов (2004 г.), а также, А.В. Тарабанько (2007 г.), А.И. Кожурина, В.В. Пономарева, Т.К. Пинегина (2008 г.) [52]. Однако, целевая направленность их была на изучение активной разрывной тектоники Камчатки. Исследований по созданию научно-методической основы метода георадиолокации применительно к Камчатке не проводились. Известны единичные случаи исследований отдельными организациями при инженерно-геологических изысканиях.

Целью исследований является: создание научно-методической основы метода георадиолокации применительно к Камчатке, включая методику обработки и интерпретации данных, с учетом практического опыта применения на различных объектах.

Задачи исследования:

1. Оценка применимости и последующая адаптация метода георадиолокации для изучения грунтовых условий в сейсмоактивном регионе, для изучения вулканических областей и зон разгрузки гидротермальных систем.
2. Разработка методики обработки и интерпретации данных георадиолокации применительно к Камчатке.
3. Комплексный анализ данных георадиолокации с учетом геологических, геоморфологических, гидрогеологических особенностей исследуемых объектов на Камчатке.

Объектом исследований являются: геологические особенности грунтовых условий города Петропавловска-Камчатского, георадарные фации вулканических областей и структура зон разгрузок гидротермальных систем Камчатки.

Предмет исследования:

Для оптимизации метода георадиолокации необходимо сопоставление и анализ результатов геофизических наблюдений в различных геологических условиях. Необходимость такого изучения

проявляется в трех важных направлениях: 1) изучение грунтовых условий строительных площадок для обеспечения безопасности при дальнейшем проектировании инфраструктуры в районах с высокой сейсмической активностью; 2) исследование зон разгрузки гидротермальных систем для дальнейшего освоения геотермальных ресурсов; 3) оценка применимости и последующая адаптация метода георадиолокации для изучения вулканических областей и выделения георадарных фаций, затрагивающие процесс рельефообразования.

Методы исследований: при выполнении поставленных задач применялись современные технологии геофизических наблюдений (с помощью георадара «ОКО-250»), позволившие получить достоверный полевой материал. Использованы методы выявления изменения диэлектрической проницаемости и скорости распространения электромагнитных волн для разного типа грунтов, методы качественной и количественной интерпретации данных по волновой картине радарограмм.

Научная новизна работы:

1. На основе применения георадарных исследований впервые в условиях Камчатки показано, что в естественном залегании грунты обладают контрастными электрофизическими свойствами, позволяющими уверенно расчленять разрез грунтов по их литологическим свойствам и степени обводненности. Эти данные повышают достоверность изучения инженерно-геологических (грунтовых) условий Камчатки, что важно для обеспечения безопасности при дальнейшем проектировании инфраструктуры в районах с высокой сейсмической активностью.

2. Впервые выделены георадарные фации в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов. Это затрагивает актуальные вопросы о генезисе вулканических отложений в этом районе, что помогает в выяснении характера вулканической деятельности исследуемой области.

3. Впервые на основе комплексного анализа данных георадиолокации получена детальная информация о гидрогеологической обстановке районов исследований некоторых гидротермальных

систем. Применяемый метод и анализ данных может быть использован для других районов с подобным геологическим строением.

Практические результаты исследования:

- установлены оптимальные параметры георадарных измерений, позволяющие выделять полезные сигналы на фоне помех, что повышает информативность критериев определения точечных и протяженных объектов на радарограммах;

- по данным электрофизических свойств грунтов выполнены литологическое расчленение разреза и оценка их степени обводнённости, необходимые для расчётов требований безопасности строительства жилых и производственных объектов Петропавловска–Камчатского;

- получены новые данные, отражающие особенности геологического строения исследуемых объектов.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием большого объема фактического материала, полученного в различные периоды наблюдений; использованием современной аппаратуры на базе современных программных средств регистрации и обработки данных, а также применением комплекса методов качественного и количественного анализа результатов.

Научная и практическая значимость результатов исследований:

Исследования выполнялись на протяжении большого периода времени. Например, в рамках договора о сотрудничестве между Ташкентским государственным техническим университетом и Камчатским государственным университетом в области образования, науки и подготовки высококвалифицированных кадров для научного развития Узбекистана и России, в том числе Камчатского края (договор №64/12 от 27.11.2020 г.); при выполнении заданий по проектам РФФИ (№ 08-05-00453а «Исследование методами математического моделирования и вулканологии процессов зарождения и развития систем магматических очагов в вулканических центрах и кальдерных комплексах Камчатки и механизмов вулканической деятельности для оценки геотермальных ресурсов и вулканической опасности» (номер 49415); при поддержке Министерства образо-

вания и науки РФ и ФНИ Госакадемий («Развитие методов прогноза, поиски и оценка нетрадиционных видов энергетических ресурсов Камчатского края»; «Геодинамика и сейсмичность современных островодужных систем Дальнего Востока» (номер государственной регистрации НИР: 01201263350); проект НИР № АААА-А19-119072290002-9 «Природные катастрофы Камчатки: землетрясения и извержения вулканов» (2020 – 2021 гг.).

Важным практическим результатом исследований является выработка рекомендаций по выбору параметров измерений прибора георадар «ОКО-250» для решения геологических задач.

Все работы выполнялись в рамках около 25 заказов производственных организаций ООО «Квантум», ООО «Изыскатель», ООО «КамчатТИСИЗ» и других камчатских изыскательских организаций с целью выполнения инженерно-геологических, инженерно-экологических и инженерно-геофизических работ. Результаты работ были использованы для реконструкции объектов инфраструктуры, расположенных на территории исследования. В рамках проекта программы ФНИ Госакадемий на 2013-2020 гг. «Геодинамика и сейсмичность современных островодужных систем Дальнего Востока» результаты работ представлены в разделе «Изучение грунтовых условий и особенностей развития процессов внешней геодинамики в сейсмоопасных зонах».

Внедрение результатов исследования:

Методика комплексной интерпретации геофизических данных и предложения по определению оптимальных параметров геофизических наблюдений внедрены в Центр передовых технологий Министерства инновационного развития Республики Узбекистан (Справка № 02-02/3567 от 18 июня 2021 года Министерства инновационного развития Республики Узбекистан). Результаты внедрения позволили повысить точность и достоверность интерпретации радарограмм при оценке грунтовых условий.

Предложения по выбору параметров измерений для выделения полезных геофизических сигналов на фоне других физических помех и повышения информативности определения точечных и протяженных объектов на радарограммах внедрены в Центр передо-

вых технологий Министерства инновационного развития Республики Узбекистан (Справка № 02-02/3567 от 18 июня 2021 года Министерства инновационного развития Республики Узбекистан). Результаты внедрения позволили повысить точность инженерно-геофизических наблюдений и достоверность выделения георадарных фаций.

Методика комплексного применения геофизических методов и полученные данные по строению и грунтовым условиям внедрена в производственный процесс ООО Научный Инновационный Центр Геопульс (Справка № 29/6-01 от 29 июня 2021 года ООО Научный Инновационный Центр Геопульс). Результаты внедрения позволили обеспечить устойчивость сооружений при развитии городской инфраструктуры Петропавловска-Камчатского.

Методика георадарной съемки и интерпретации данных совместно с данными ГИС внедрена в производственный процесс ООО НИЦ «Геоконсалтинг» (справка от 03 декабря 2018 г.). Все результаты направлены на реконструкции исследуемых территории под строительство зданий и сооружений.

ГЛАВА I

СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

§1.1. Актуальность и востребованность метода георадиолокации для изучения грунтовых условий при инженерно-геологических изысканиях

Малоглубинная геофизика оформилась как самостоятельное направление геофизических методов исследований сравнительно недавно. Можно сказать, что это одно из новых научно-практических направлений разведочной геофизики, занимающееся изучением приповерхностной части земной коры. Для оптимизации методов малоглубинной геофизики необходимо сопоставление и анализ результатов геофизических наблюдений в различных геологических условиях.

В сфере строительства очень важно изучение и полный анализ геологических условий строительной площадки. Детальное исследование на начальном этапе поможет в дальнейшем избежать неравномерной осадки зданий и сооружений, повреждений и разрушений инженерных сетей, необратимые деформации и их полный выход из строя. Изучение всех особенностей геологии территории как основания инженерного сооружения производится в ходе инженерно-геологических изысканий. От полноты и качества таких работ зависит достоверность оценки взаимного влияния здания и его основания, выполнение наиболее экономичного проектирования и последующее строительство. По результатам работ определяются наилучшие и наиболее оптимальные тип и глубина заложения фундамента. В связи с этим в инженерно-геологические изыскания стали широко внедряться геофизические методы исследования, среди которых методы георадиолокации, сейсморазведки и электроразведки.

Основными методами исследования являются: сейсморазведка методом преломленных (МПВ) и отраженных (МОВ) волн, электроразведка постоянным током в модификациях вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ), частотных электромагнитных зондирований (ЧЭМЗ) и зондирований становлением поля (ЗСП). Все виды геофизического профилирования входят в состав вспомогательных методов. При наличии скважин в комплексе должны использоваться те виды каротажа, которые фиксируют указанные различия контактирующих грунтов по перечисленным выше свойствам. Данные каротажа, лабораторных и параметрических измерений на образцах, керне и на обнажениях используются для более точной интерпретации результатов наземных наблюдений. Изучение состава, строения, состояния и свойств грунтов выполняется параллельно с изучением геологического строения массива, но может являться и самостоятельной целью и выполняться по специально составленной программе [41, 46, 86, 88, 98, 99].

При сильнейших землетрясениях происходят массовые разрушения зданий и сооружений вследствие интенсивных сотрясений при излучении сейсмических волн из очага и вторичных сейсмогеологических процессов, в т. ч. разжижения грунтов. Сейсмовибрационное разжижение грунтов является одним из наиболее опасных вторичных процессов при землетрясениях, которое может вызывать ущерб, сопоставимый с ущербом при цунами и пожарах [57]. Все это определяет важность точного исследования геологических условий строительных площадок для обеспечения безопасности при дальнейшем проектировании инфраструктуры.

Камчатским филиалом Дальневосточного треста инженерно-строительных изысканий (КФ ДальТИСИЗ) в 1971–1974 гг. были проведены инженерно-геологические исследования в г. Петропавловске-Камчатском и составлены карты фактического материала, геологическая, геоморфологическая, гидрогеологическая и карта инженерно-геологических условий в масштабе 1:10000. Территория города по инженерно-геологическим условиям разделена на четыре области: А, Б, В и Г (рис. 1). В каждой из выделенных областей были выделены благоприятные, условно благоприятные, условно неблагоприятные и неблагоприятные районы для строительства [57].

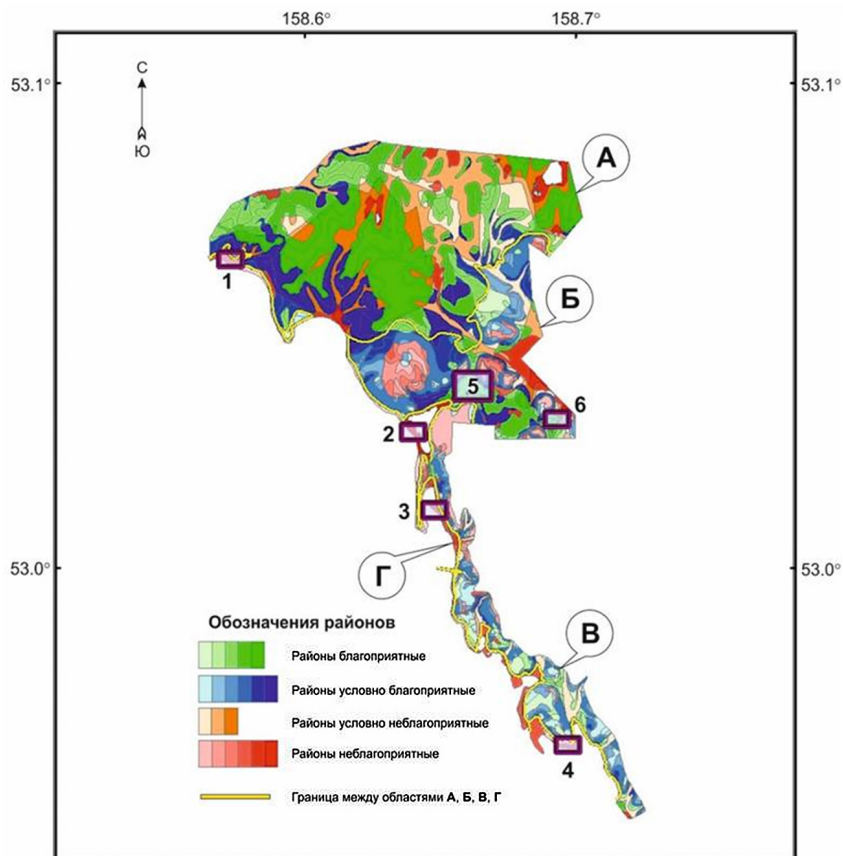


Рис. 1.1. Карта инженерно-геологического районирования г. Петропавловска-Камчатского. А, Б, В, Г – выделенные области по инженерно-геологическим условиям [57]

Карты микросейсмического районирования г. Петропавловск-Камчатский, составленные в 1974 и 1981 гг., были объединены в единую карту СМР с выделением зон сейсмической интенсивности VIII, IX и X баллов (рис. 2). Разжижение грунтов при сильных землетрясениях в г. Петропавловске-Камчатском происходит, в основном, в зоне с сейсмической опасностью X баллов.

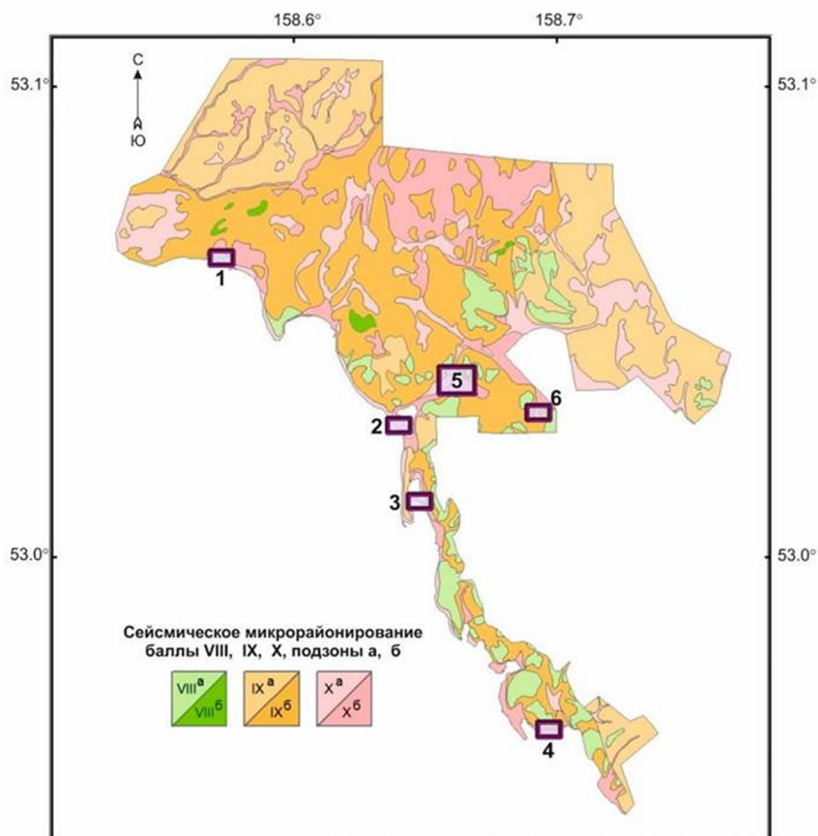


Рис. 1.2. Карта сейсмического микрорайонирования (СМР)
г. Петропавловска-Камчатского [57]

Эта зона занимает 30% площади в северной, северо-восточной и центральной частях города в местах распространения обводненных грунтов различного генезиса. В зону с сейсмичностью X баллов отнесены: а) щебенистые, дресвяные и супесчаные грунты средней плотности (объемный вес $2.0 - 2.10 \text{ г/см}^3$) с глубиной залегания УГВ 10% обеспеченности менее 3 м; б) менее плотные дресвяные, супесчаные и песчаные грунты (объемный вес менее 2.0 г/см^3)

с глубиной залегания УГВ до 4 м; в) заилованные, заторфованные и другие слабые грунты; г) склоны круче 15%, сложенные рыхлыми грунтами; д) склоны крутизной 10–20% при наличии других неблагоприятных факторов: повышенной влажности, малой плотности отложений, повышенного содержания в них песка и супеси; е) обрывы и склоны крутизной более 30%, сложенные рыхлыми и коренными породами; ж) насыпные и намывные грунты при глубине залегания подземных вод менее 4–6 м; з) участки повышенной интенсивности сотрясения при землетрясении 1971 г., независимо от инженерно-геологических условий. Участки развития опасных физико-геологических процессов (оползи, обвалы, лавины) также отнесены к X-балльной зоне [57].

Широкое применение сейсморазведочных методов исследований на участках строительства в Камчатском крае, определяется тем, что регион характеризуется высокой сейсмической опасностью. Поэтому исходное значение сейсмической опасности, должно корректироваться за счет уточнения сейсмических свойств грунтов на конкретных участках строительства (сейсмическое микрорайонирование (СМР)). Материалы работ по сейсмическому микрорайонированию (СМР) участка строительства должны содержать количественные оценки влияния особенностей залегания слоев и сейсмических свойств грунта (расчетной толщи на амплитудные и спектральные характеристики сейсмического воздействия). Для решения поставленных задач выполняются сейсморазведочные исследования, электроразведочные работы, проводится камеральная обработка материалов, анализируются фондовые материалы [113].

Достоинством метода георадиолокации¹ является универсальность, позволяющая использовать георадары² для решения разного рода задач. Данный прибор помогает проводить инженерно-геоло-

¹ **Метод георадиолокации** (англ. Ground-penetrating radar, GPR) как метод геофизического обследования основан на излучении широкополосного сигнала радиочастотного диапазона в толщу среды и регистрации отклика – сигнала, являющегося суперпозицией амплитуд прямых, отраженных и преломленных волн, достигших приемной антенны [81; с. 154-161].

² **Георадар** – радиотехнический прибор подповерхностного зондирования [82; 92 с.].

гические изыскания, не нарушая целостность поверхности, обеспечивает мобильность и высокую скорость проведения работ, требует минимального количества обслуживающего персонала, характеризуется картографированием неоднородностей в режиме «реального времени», а также возможностью точного определения глубины залегания картируемых границ. Преимущества метода георадиолокации в том, что на протяженных участках получают непрерывные данные по геологическому строению и определению влажности грунтов в их естественном залегании [108; с. 72-76]. В России метод георадиолокации активно применяется в сфере строительства, а также успешно используется для картирования кровли коренных пород, нарушенных в результате тектонических движений [96; с. 351-355, 97; с. 333-337]. Метод применим для изучения четвертичных отложений разного генезиса [101; с. 62-75, 108; с. 72-76].

Благодаря методу георадиолокации возможно решение следующих задач: изучение геологических разрезов с определением мощностей слоев и типов пород; определение положения уровня грунтовых вод; выявление зон повышенной обводненности; выявления участков развития опасных геологических процессов (картирование оползневых структур).

Первый опыт применения метода георадиолокации для решения геологических задач на Камчатке был в 2004 году [1; с. 125-129]. Также был опыт применения метода при изучении разрывных нарушений, связанных с коровыми землетрясениями в районе реки Поперечная на Южной Камчатке, и далее, при изучении активной разломной тектоники юга Центральной Камчатки [105; с. 154-158, 52; с. 10-27]. В настоящее время метод георадиолокации активно используется при инженерно-геологических изысканиях для уточнения грунтовых условий в городе Петропавловск-Камчатский.

§1.2. Применение метода георадиолокации на вулканах.

Гидротермальные системы Камчатки и задачи по изучению зоны их разгрузок

Одними из наиболее интересных и сложных регионов при использовании георадаров являются районы активного вулканизма.

Большая мощность почвенно-пирокластического чехла, полигенетические профили почв, значительное число погребенных почвенных горизонтов, разделенных прослоями тефры разного гранулометрического состава и возраста, с одной стороны, создают хорошие условия для формирования четких линий равных фаз отраженных сигналов (осей синфазности) на георадиолокационном профиле, а с другой стороны – затрудняют их интерпретацию. Существующий опыт использования георадаров в районах с активными вулканами невелик [17]. Например, в Калифорнии с помощью георадара были установлены граница и мощность пирокластического чехла, выявлены небольшие кратеры, заполненные сверху аллювием [128]. Однако многие аспекты использования георадаров в вулканических районах остаются недостаточно изученными [17]. Все это определяется актуальность исследования на Камчатке с помощью метода георадиолокации.

На «Карте полезных ископаемых Камчатской области», составленной геологами Камчатки и опубликованной в 1999 г., список полезных ископаемых составляет 1889 наименований. По такой категории, как «термоминеральные воды», на карте показано 58 месторождений и 118 проявлений. В настоящее время на Камчатке используется лишь несколько месторождений термальных вод. ОАО «Геотерм» эксплуатирует Мутновское месторождение парогидротерм, а такое предприятие, как «Камчатскбургеотермия» отвечает за эксплуатацию восьми месторождений термальных вод: Паратунского, Верхне-Паратунского, Эссовского, Анавайского, Нижне-Озерновского, Пущинского, Южно-Бережного и Паужетского. На Камчатке изучением геологического строения гидротермальных систем занимались: В.В. Аверьев [2; с. 80-98, 3; с. 118-128, 4; 208 с.], Е.А. Вакин [12; 160 с.], И.Т. Кирсанов, Т.П. Кирсанова [13; с. 42-50], А.И. Сережников [14; с. 270-276], В.М. Зимин [15; 174 с.], Э.Н. Эрлих, В.И. Белоусов [16; с. 5-22, 20; с. 85-114], В.Л. Леонов [65; 104 с.] и другие исследователи [5, 6, 7, 8, 34, 35, 67, 68, 79, 123; р. 73-83, 132; р. 1116-1133].

Все высокотемпературные гидротермальные системы Камчатки приурочены к вулканическим поясам, которые сложены много-

численными вулканами преимущественно плиоцен-четвертичного возраста. Выделяется два таких пояса: Восточно-Камчатский и Центральнo-Камчатский (Срединный). Они вытянуты вдоль полуострова в северо-северо-восточном направлении и имеют каждый длину около 700 км и ширину до 100-130 км. Гидротермальные системы, как и действующие вулканы Камчатки, приурочены преимущественно к Восточно-Камчатскому вулканическому поясу. В его пределах расположено 9 из 11 высокотемпературных гидротермальных систем, а также 29 из 30 действующих вулканов. В пределах Центральнo-Камчатского (Срединного) вулканического пояса расположено две высокотемпературных гидротермальных системы и всего один действующий вулкан. Наиболее крупные приповерхностные тепловые аномалии на Камчатке связаны с современными *гидротермальными системами*, под которыми камчатские геотермики обычно понимают специфические водонапорные системы, возникающие в земной коре в областях современного вулканизма при внедрении в водоносные слои глубинного теплоносителя – магмы или надкритического водного флюида [65; 104 с.].

Скопления термальных вод могут формироваться и вне областей современного вулканизма – в седиментационных бассейнах или глубоких зонах тектонических дроблений. Они характеризуются меньшим удельным выносом тепла в очагах разгрузки, но также являются гидротермальными системами. По В.И. Кононову, термин “гидротермальная система” может быть отнесен ко всем гидродинамическим системам, заключенным в рамках отдельных геологических структур, формирующимся либо при нагревании вод в региональном тепловом поле в результате их глубокой циркуляции, либо еще и при дополнительном поступлении в водоносные горизонты глубинного тепла, приносимого магмой или надкритическим флюидом [56; 216 с.].

Г. Бодварссон разделил гидротермальные системы на две основные группы: низкотемпературные и высокотемпературные с базовой температурой меньше и больше 150⁰С соответственно [124; р. 1-19]. По В.В. Аверьеву высокотемпературные гидротер-

мальные системы на глубине связаны единым фронтом теплового питания – **геотермальные районы**. На Камчатке выделяют четыре геотермальных района: Паужетский, Мутновский, Семячинский и Паратунский. Гидротермальная система состоит из: (1) источника тепла, (2) резервуара с термальными флюидами, (3) окружающего “района питания” и (4) участка поверхностной разгрузки. В тех случаях, когда горячая вода или пар вблизи поверхности Земли попадают в проницаемые или пористые породы, перекрытые слоем слабо проницаемых пород, то может сформироваться **геотермальный резервуар** [3; с. 118-128].

Геотермальными системами называются участки литосферы, в пределах которых тепловой поток существенно превышает фоновый. Если не рассматривать техногенные геотермальные системы в земной коре (системы теплового загрязнения подземных вод, разогрева пород над зонами захоронения радиоактивных отходов, подземной газификации углей и т.д.), то появление таких аномалий в естественных условиях может быть вызвано кондуктивным теплопереносом (лито- и петротермальные системы) и конвективным теплопереносом (магматические, флюидные и гидротермальные системы), либо сочетанием обеих процессов. К гидротермальным относятся водные системы конвективного теплопереноса в земной коре. Необходимым условием для их формирования является пространственное сочетание трех факторов: 1) развитие проницаемой для воды зоны (гидротермального резервуара), 2) их обводненность, 3) наличие под проницаемыми зонами источника теплового питания. Таким образом, геотермальная система, в отличие от гидротермальной системы, обозначает более широкий круг систем (по масштабам) и включает тепловые системы в земной коре, заключенные в нагретых горных породах, которые представляют собой остывающие магматические тела, или, как их принято называть в геологии, интрузии [12; 160 с.].

Понимание трехчленности строения гидротермальных систем (рис. 1.3) пришло еще в начале прошлого века, и к настоящему времени окончательно оформилось в концепции гидротермальных резервуаров [50; 160 с.]. Подошва нижнего субрезервуара является

нижней границей всего резервуара, а подстилающие его породы называются бедроком. Вся толща пород над его кровлей называется кепроком [50; 160 с., 51; 395 с.].

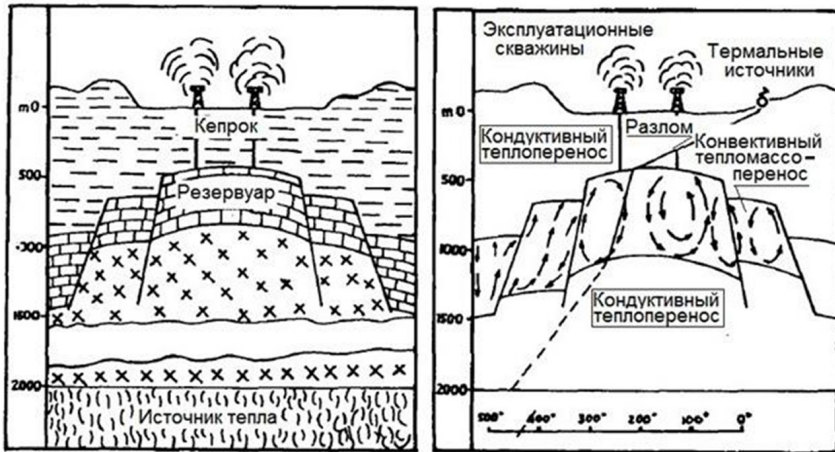


Рис. 1.3. Схема трехчленного строения гидротермальной системы в вертикальном сечении согласно Tonani и др., 1964 [133; р. 30-32]

За рубежом и в России под кепроком (от английского “сar” – шапка, “rock” – порода) часто понимают вообще породы, независимо от их состава и происхождения, играющие роль непроницаемой покрышки для нефтяных и газовых залежей [29; 486 с.]. Кепрок геотермальной системы – это слой пород с низкой проницаемостью, который перекрывает проницаемые породы резервуара [125; 271 р.]. Факка и Тонани (1967) отметили, что кепрок необходим для существования резервуара. Он может служить как барьер для циркуляции конвекционных потоков теплоносителя, как теплоизолятор, тем самым способствующий увеличению температуры в геотермальной системе. Толщина кепрока может меняться, например, в геотермальном месторождении Солтон-Си, она переменная – в северной части месторождения кепрок мощный (около 700 м), тогда как в южной – мощность понижена (около 250 м) [126].

Кепрок может состоять как из одного водоупора, так и из пачки водоупоров и проницаемых зон. Кепрок – активная динамическая система, в которой проницаемость может увеличиваться из-за деформаций, источником которых являются геомеханические и флюидомеханические процессы в резервуаре, а также уменьшаться вследствие кольтации трещин и минералообразования на геохимических барьерах. Горячая вода, циркулирующая в гидротермальной системе, может привести к изменению и осаждению минералов в кепроке, снизив тем самым его проницаемость. Таким образом, геотермальная система может самоуплотняться, а также производить и восстанавливать кепрок. Направление исследования эффекта самоуплотнения было предложено Батзл и Симмонсом [122; р. 71-93], которые исследовали образцы горных пород кепрока из площади Дюна прогиба Солтон-Си с использованием сканирующего электронного микроскопа. Они обнаружили, что трещилки и микротрещины заполнены минералами, выделяющимися из циркулирующей жидкости [131; р. 5-6]. По данным А.Д. Коробова, для кепрока (верхний водоупор по А.А. Кирюхину (2010)) характерна ассоциация гидротермальных минералов – трассеров слабопроницаемых зон (хлорита, смектита и кальцита) [89; 298 с.].

В вулканических районах кепрок сложен преимущественно разновозрастными лавами, плотными туфами и игнимбритами (N_1-Q_4) и разбит серией термовыводящих разрывных нарушений, но может пересекаться и несколькими пологими проницаемыми зонами. Чаще это типично для систем с преобладанием поровой проницаемости над трещинной (Паужетская или Вайракейская геотермальные системы, Новая Зеландия). На других системах (Мутновская геотермальная система) пологие зоны имеют ограниченное распространение [19, 20, 21, 22, 87, 104, 117]. Важной составляющей кепрока являются высокопроницаемые образования (песчаники и псефитовые туфы на Паужетской геотермальной системе, выщелоченные кварц-карбонатные жилы Войновской и т.д.). По ним происходит перетек и локальная разгрузка термальных вод. Структура кепрока не является постоянной во времени. Так, например, в работе Дж. Смита с соавторами показано на примере подземных

хранилищ углекислого газа в рассолосодержащих резервуарах, что инъекция воды в резервуар приводит к дополнительному раскрытию ранее закрытых трещин, либо соединение открытых, но бывших до инъекции изолированных трещин, что увеличивает длину сети соединяющихся проницаемых для просачивания по ним флюида трещин [63; с. 11-19, 127; р. 226-240].

При изучении геологического строения гидротермальных систем важно исследовать структуру зон перетока гидротерм в недрах и на дневной поверхности системы [89; 298 с.]. Зона разгрузки гидротермальных систем – это часть кепрока. Термальные источники обязаны своим появлением на земной поверхности соотношению горизонтов подземных вод, обусловленному геологическим строением данного участка, и профилю рельефа этого участка [12; 160 с.]. Зона разгрузки гидротермальных систем расположена вблизи поверхности Земли, часто наблюдается в виде термопроявлений и вскрыта многими скважинами. Это и определяет их большую доступность для непосредственного изучения.

Для изучения зоны разгрузки гидротермальных систем может применяться комплекс геолого-геофизических исследований (например, магниторазведка, электроразведка, гравиразведка, термометрия грунтов, проходки шурфов, отбор образцов горных пород, отбор проб воды и газа, бурение скважин). Использование морфометрических характеристик позволяет выявить особенности в строении рельефа зоны разгрузки гидротермальных систем. Таким образом, результаты комплексирования морфометрических методов изучения кровли кепрока с геофизическими методами позволяют более уверенно понимать глубинное строение резервуаров [24; с. 54-64, 54, 89; 298 с., 109; с. 353-356].

Трудности, связанные с получением керна, его изучением и определением содержания полезных ископаемых во вскрытых скважиной породах, привели к созданию геофизических и геохимических методов исследования скважин³, которые позволяют опера-

³ *Геофизические исследования скважин (ГИС)* – совокупность физических методов, предназначенных для изучения горных пород в околоскважинном и межскважинном пространствах [31; 398 с.].

тивно и достаточно полно решать указанные задачи [42]. Каротаж⁴ заключается в измерении вдоль ствола (оси) скважины при помощи различных специальных установок какой-либо физической или химической величины, характеризующей свойства горных пород. Поэтому по его результатам можно получить информацию, какие породы пройдены скважиной и каковы их особенности. Зарегистрированные каротажные диаграммы⁵ после внесения поправок и расстановки меток вычерчиваются тушью (разным цветом), копируются и являются основным документом геофизических исследований скважин.⁶

Геотермические измерения в скважинах (первые геофизические исследования в России) были выполнены еще в 1906 г. (Д.В. Голубятниковым), а в 1929 г. и в последующие годы был внедрен электрический каротаж с замерами КС и ПС (Л.М. Альпин, В.Н. Дахнов, С.Г. Комаров и др.). В 30-х гг. прошлого века были получены первые результаты гамма-каротажа (В.А. Шпак, Г.В. Горшков, Л.М. Курбатов) [58; 317 с.]. Гамма-каротаж и метод потенциалов собственной поляризации являются стандартными методами геофизических исследований в скважинах, и во всем мире активно используются при изучении нефтяных, газовых, твердых месторождений полезных ископаемых и подземных вод [10, 11; с. 19-177, 62; с. 11-19, 110; с. 13-17]. Для этого различные компании постоянно разрабатывают аппаратуру и комплексы для геофизических исследований скважин [78; с. 24-51]. На Камчатке гамма-каротаж и метод потенциалов собственной поляризации активно применялись с целью изучения газо-конденсатных и газо-нефтяных месторождений на западном побережье Камчатки и в шельфовой зоне Охотского моря. Помимо этого, в 80-е и 90-е гг. методы использовались на геотермальных месторождениях Камчатки (например, Паужет-

⁴ **Каротаж** – геофизические исследования, предназначенные для изучения горных пород, непосредственно примыкающих к стволу скважины [31; 398 с.].

⁵ **Каротажная диаграмма** – любое отображение состояния скважины в табличной или графической форме [29; 486 с.].

⁶ Здесь говорится о каротажных диаграммах, записанных на бумажных носителях. Сейчас все каротажные диаграммы записываются в электронной виде на компьютере с помощью специальных программ.

ское, Паратунское, Мутновское) с целью выявления продуктивных горизонтов и последующей эксплуатации термальных вод.

Георадиолокационные исследования позволяют выделять вертикальные зоны повышенной неоднородности (раздробленности) и обводненности подстилающих пород ландшафтов, по которым разгружаются термальные воды [81, 116; с. 81-86]. Можно сказать, что это «новое» направление использования данного метода исследования с целью изучения приповерхностной зоны гидротермальных систем. Пример таких работ представлен в статье⁷ по изучению зоны разгрузки Дагинской гидротермальной системы (Сахалин) с помощью георадара серии «ОКО-150».

Дагинская гидротермальная система расположена в Ногликском районе Сахалинской области на восточном побережье северной части о. Сахалин в прибрежной полосе Северо-Сахалинской низменности, вблизи нефтяной площади Монги. Рядом находится Ныйский залив, который отделен от моря песчано-галечниковыми дюнами, иногда достигающими значительной ширины⁸.

Проведено детальное изучение строения верхней толщи Дагинской гидротермальной системы с применением такого современного геофизического метода, как георадиолокационная съемка. Современная георадиолокационная съемка в пределах Дагинского месторождения проведена впервые, информативность результатов георадиолокационных измерений высокая, так как позволяет судить о слоистых структурах, геологических неоднородностях, хотя и на небольших глубинах.

Георадиолокационный профиль 1–2 проходит вдоль гидрогеологического разреза А–Б (рис. 1.4), построенного по данным разведочных работ на Дагинском месторождении термоминеральных вод в 1990–1991 гг. [83; 218 с.].

⁷ Павлова В.Ю., Жарков Р.В. Результаты георадарных исследований на территории Дагинской гидротермальной системы (остров Сахалин) // Геосистемы переходных зон, Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН. 2018. Т. 2, № 4. С. 323-331. Ссылка на публикацию: URL: <http://journal.imgg.ru/web/full/f2018-4-6.pdf>.

⁸ Подробно о геологических и гидрогеологических особенностях Дагинской гидротермальной системы (Сахалин) можно узнать из литературных источников [9, 30, 43, 44, 45, 84, 95, 115, 118, 119].

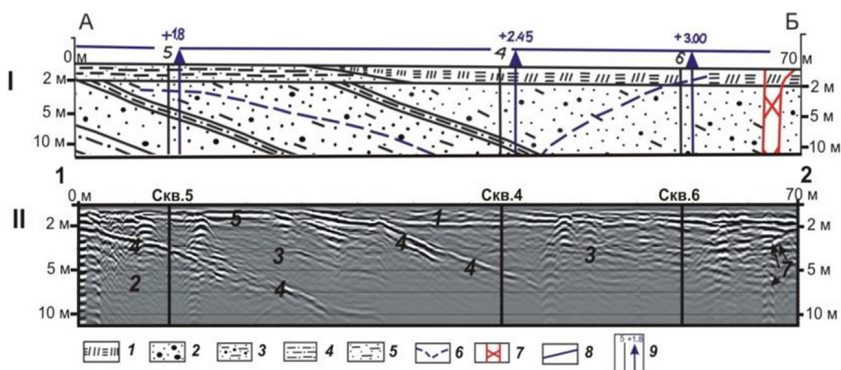


Рис. 1.4. Сопоставление гидрогеологического разреза А–Б с георадиолокационным профилем 1–2

Вверху – гидрогеологический разрез А–Б по скважинам № 5, № 4, № 6 [83; 218 с.] (цифры над стрелкой – установившийся напорный уровень от поверхности земли: +18, +2.45 и 3.00 м соответственно). 1 – торф; 2 – пески с гравием и галькой; 3 – пески глинистые с гравием и галькой; 4 – алевриты; 5 – пески глинистые, алевритовые, алеврито-глинистые; 6 – депрессионная кривая при опытно-эксплуатационной откачке (имеет асимметричный вид из-за наличия зоны питающего разлома, от которого напор распространяется к юго-востоку на 100 м, к северо-западу (по восстанию пластов) на 300–350 м); 7 – зона дробления; 8 – пьезометрический уровень. Внизу – георадиолокационный профиль 1–2. Цифры 1, 2, 3, 4, 5, 7 соответствуют условным обозначениям к гидрогеологическому разрезу А–Б по скважинам № 5, № 4, № 6.

В георадиолокационном профиле выделяются сухие пески с гравием и галькой (скорость распространения электромагнитной волны – 20.3 см/нс, диэлектрическая проницаемость – 2.19). Данные отложения перекрываются влажными песками глинистыми (до 1.5% воды) с гравием и галькой в области скважин № 5 и № 4 (скорость распространения электромагнитной волны – 14.9 и 14.0 см/нс, диэлектрическая проницаемость – 4.0 и 4.6) и сухими песками в области скважины № 6 (скорость распространения

электромагнитной волны – 26.3 см/нс, диэлектрическая проницаемость – 1.29). Выделяются в разрезе слои алевритов высокой влажности мощностью до 1 м, что видно из значений скорости распространения электромагнитной волны (3.8 и 3.7 см/нс) и диэлектрической проницаемости (60.3 и 65.6). Перекрыты данные отложения (в начале профиля) песками глинистыми, алевритовыми, алеврито-глинистыми, мощностью слоя до 2 м (скорость распространения электромагнитной волны – 22.8 см/нс, диэлектрическая проницаемость – 1.7). Также на поверхности залегает торф (в конце профиля), мощность которого достигает 2 м (скорость распространения электромагнитной волны – 20.2 и 22.2 см/нс, диэлектрическая проницаемость – 1.8 и 2.1). На радарограмме хорошо видна зона дробления. Участки с подобной записью [47; с. 3133-3138, 69; с. 1616-1633, 96; с. 351-355] смещаются друг относительно друга по вертикали в виде проходящих электромагнитных волн, пересекающих горизонтально расположенные оси синфазности. Частые переходы одних литологических разностей пород в другие указывают на лагунно-морской, аллювиальный и элювиально-делювиальный характер образования осадков.

Георадиолокационный профиль 3–4 (рис. 1.5) находится вблизи морского побережья, на нем до глубины 2 м выделяется горизонтальная граница соленой воды. Данная граница наблюдается вдоль морского побережья в зоне разгрузки Дагинской гидротермальной системы. В природе встречаются примеры обнаружения ярких осей синфазности на радарограммах, которые соответствуют мало контрастным по диэлектрической проницаемости границам. Менее плотная пресная вода из земли образует слой над соленой водой из океана. Однако на радарограммах отчетливо видна эта граница и отражение от неё настолько сильное, что под ней пропадает отражение от дна устья, расположенное на малой глубине. Остальные оси синфазности на радарограмме ниже 2 м – это результат отражения от уровня соленой воды. На радарограмме хорошо выделяется основной признак многократных отражений – это кратное увеличение времени прихода отраженной волны.

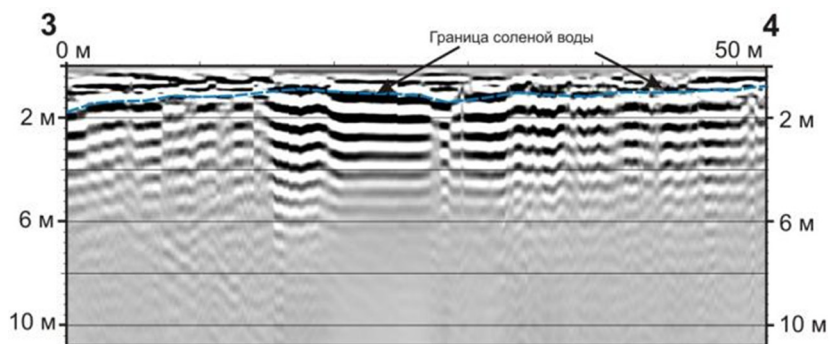


Рис. 1.5. Георадиолокационный профиль 3–4

На всех остальных георадиолокационных профилях (рис. 1.6) выделяются отложения торфа мощностью до 2 м. На всех радарограммах конфигурация осей синфазности является очевидной для интерпретации, по которым можно выделить два типа областей: 1) с ярко выраженными осями синфазности георадиолокационных сигналов, что указывает на ненарушенные геологические слои отложений; 2) с низкими значениями амплитуд сигналов, что указывает на ослабленность горных пород вследствие дробления и трещиноватости. Благодаря этому хорошо видна морфология погребенных палеодолин – наличие ложбин стока на глубинах около 6 м и расширение источников сноса и увеличение количества обломочного материала, сносимого в морской бассейн. Это привело к накоплению в относительно короткое время песчано-алевритоглинистых отложений.

Георадарными исследованиями в пределах Дагинской гидротермальной системы установлено наклонное залегание слоев и чередование влажных и сухих песков глинистых, алевритовых, алевритоглинистых. На радарограммах выделяются как минимум три участка, на которых наблюдается смена георадарных фаций:

1) субгоризонтальное расположение осей синфазности, первый слой от поверхности, представленный в основном отложениями торфа;

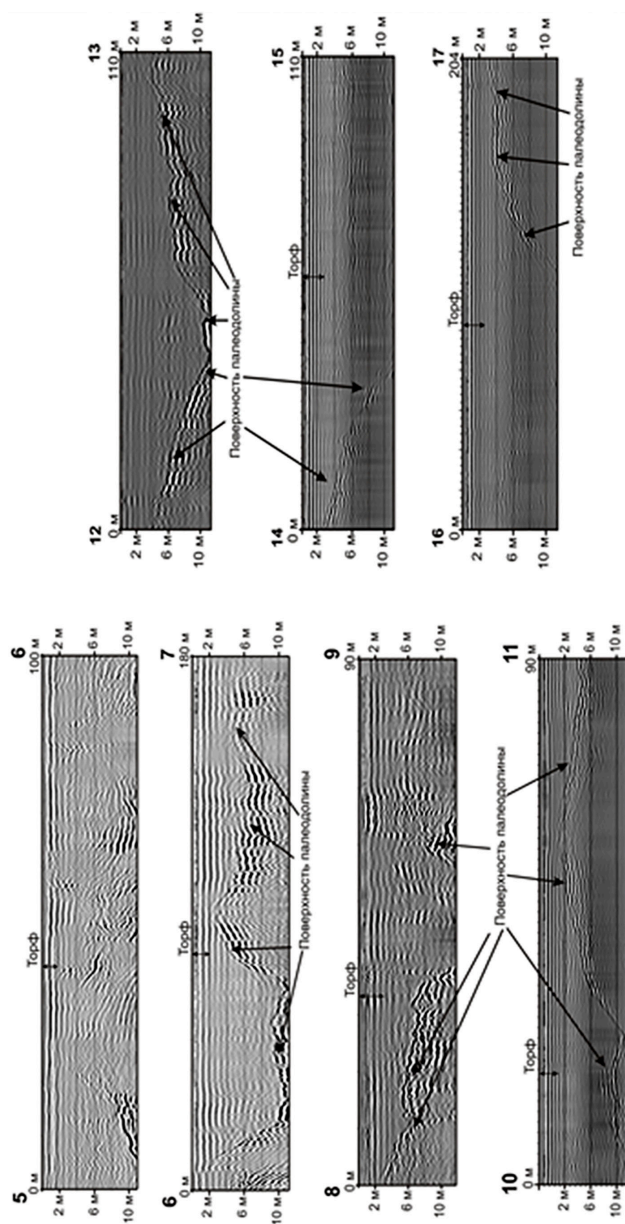


Рис. 1.6. Георадиолокационные профили 5–6, 6–7, 8–9, 10–11, 12–13, 14–15, 16–17

2) наклонное и хаотическое расположение осей синфазности, второй слой от поверхности, представленный в основном песками глинистыми с гравием и галькой; 3) хаотическое расположение осей синфазности, наличие дифракций, что указывает на наличие зон трещиноватости. Выделяется повсеместно плотный глинистый грунт до 2 м, что, очевидно, создает слой пород с низкой проницаемостью. Он перекрывает проницаемые породы, представленные песками разного состава. Этот слой может служить как барьером для циркуляции конвекционных потоков теплоносителя, так и теплоизолятором, способствующим увеличению температуры в гидротермальной системе.

На георадарном профиле 1–2 (рис. 1.4) на Центральном участке месторождения удалось зафиксировать зону дробления. Возможна, она входит в серию термовыводящих разрывных нарушений, пересекающихся с несколькими пологими проницаемыми зонами, и входит в систему разломов меридионального и субширотного простирания, характерных для этой территории и составляющих мозаику тектонических блоков. Можно сделать вывод, что кепрок на данной территории состоит из пачки водупоров и проницаемых зон.

Установленная георадарными исследованиями морфология погребенных палеодолин (отмечаются на глубине около 6 м) указывает на наличие ложбин стока, накопление песчано-алеврито-глинистых отложений, повсеместно перекрытых образованиями торфа мощностью до 2 м. Возможно, что по ним происходит перетек и уже локальная разгрузка термальных вод ближе к побережью. Результаты георадиолокационной съемки хорошо согласуются с реальными опорными гидрогеологическими разрезами территории, что подтверждает успешность применения этого метода неразрушающего контроля для получения достоверных данных о гидрогеологической обстановке района исследований.

Выводы по главе 1

1. Анализ опубликованной литературы показал, что в последние десятилетия появились новые методы малоглубинных геофизических исследований земной коры и ее приповерхностных частей,

основанные на новейших технологиях применения аппаратных возможностей в сочетании с встроенными программными комплексами получения и обработки данных. Они позволяют с большой детальностью изучать особенности структуры приповерхностной части и инженерно-геологических условий отдельных территорий. Одним из таких методов малоглубинной геофизики является георадарная съемка, которая еще не применялась в условиях Камчатки, где необходимость исследований инженерно-геологических условий и строения отдельных объектов ввиду активности природных явлений имеет важное особенное значение.

2. Необходимость такого изучения проявляется в трех важных направлениях: 1) изучение грунтовых условий строительных площадок для обеспечения безопасности при дальнейшем проектировании инфраструктуры в районах с высокой сейсмической активностью; 2) исследование зон разгрузки гидротермальных систем для дальнейшего освоения геотермальных ресурсов; 3) оценка применимости и последующая адаптация метода георадиолокации для изучения вулканических областей и выделения георадарных фаций, затрагивающие процесс рельефообразования.

3. Для достижения этой цели были определены следующие основные задачи:

1. Оценка применимости и последующая адаптация метода георадиолокации для изучения грунтовых условий в сейсмоактивном регионе, для изучения вулканических областей и зон разгрузки гидротермальных систем.

2. Разработка методики обработки и интерпретации данных георадиолокации применительно к Камчатке.

3. Комплексный анализ данных георадиолокации с учетом геологических, геоморфологических, гидрогеологических особенностей исследуемых объектов на Камчатке.

ГЛАВА II

МЕТОДИКА⁹ ИССЛЕДОВАНИЙ

§2.1. Методика и аппаратура метода георадиолокации

Приборы георадар серии «ОКО-2» изготовлены НИИ Приборостроения им. В.В. Тихомирова (г. Жуковский). Базовый комплект георадара серии «ОКО-2» включает в себя: приемный и передающий антенные блоки; оптический преобразователь; аккумулятор БП-9/12; оптический и электрический кабели связи; датчик перемещения; подвеску с ноутбуком и блоком управления георадаром; штангу-ручку (рис. 2.1). Функциональная схема георадара «ОКО-250» представлена на рисунке 2.2.



Рис. 2.1. Оператор с георадаром «ОКО-250» в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов (п-ов Камчатка)

⁹ В данной работе под словом «методика» подразумеваем описание конкретных приемов, способов исследования для решения поставленных задач [102, 103, 111; 416 с.].

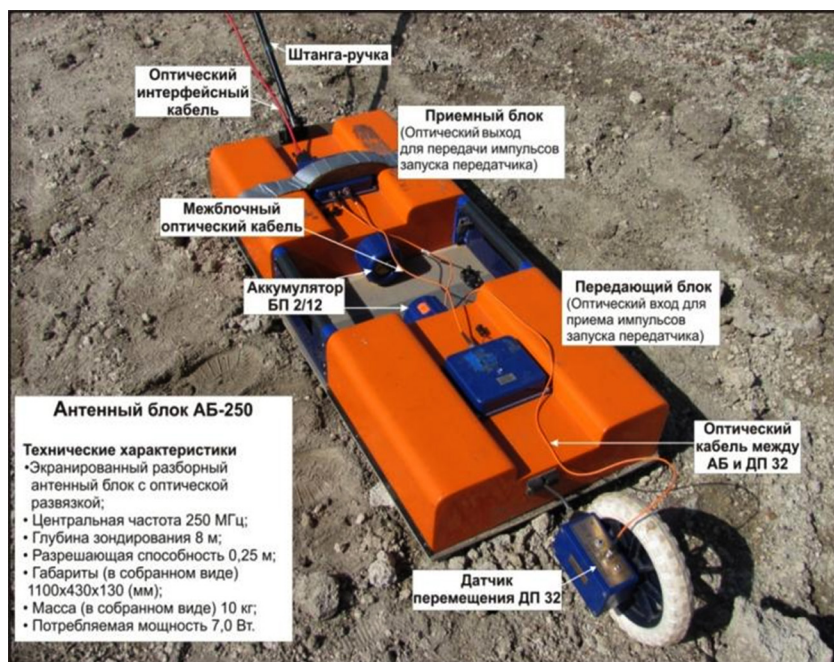


Рис. 2.2. Функциональная схема георадара «ОКО-250»

Для получения надежных результатов при использовании георадара необходимо учитывать два основных момента, первый – характеристики прибора, второй – параметры изучаемой среды. Центральная частота, глубина зондирования и разрешающая способность георадара определяют точность георадиолокации [82].

Метод георадиолокации основан на явлении отражения электромагнитной волны от границ неоднородностей в изучаемой среде, на которых скачкообразно изменяются электрические свойства: электропроводность и диэлектрическая проницаемость. Излучаемые георадаром электромагнитные сверхширокополосные импульсы, распространяющиеся в обследуемой среде, отражаются от находящихся там объектов и слоев грунта, принимаются антенной, усиливаются, преобразуются в цифровой вид и обрабатываются

на ЭВМ. Далее информация об обнаруженном объекте визуализируется на мониторе [27; с. 65, 94; с. 336-341] (рис. 2.3).

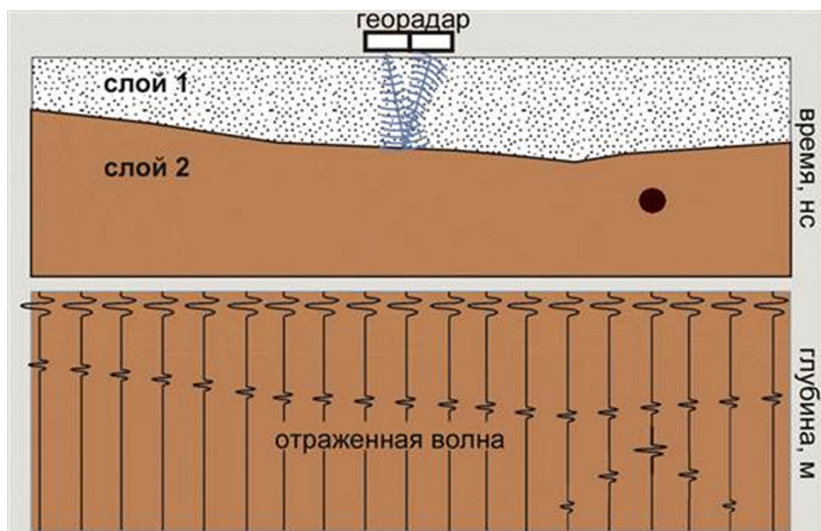


Рис. 2.3. Принцип метода георадиолокации [106; 93 с.]

Основными величинами, измеряемыми при георадарных исследованиях, являются время пробега электромагнитной волны от источника до отражающей границы и обратно до приемника, а также амплитуда этого отражения. Такими границами раздела в исследуемых средах являются контакты между породами различного литологического состава, между коренными и рыхлыми породами.

В результате георадиолокационных исследований получают временные разрезы (радарограммы¹⁰), записанные методом переменной плотности, на которых по горизонтали указывается расстояние в метрах, а по вертикали – время прихода отраженных сигналов в наносекундах [23; 153 с., 85; 28 с., 100; с. 42-52].

¹⁰ **Радарограмма** – волновая картина, совокупность трасс вдоль профиля съемки, протяженные по глубине оси синфазности отраженного сигнала, белые (отрицательные полуволны) и черные (положительные полуволны) [100; с. 42-52].

В результате серии работ, проведенных на Камчатке, рекомендуется следующее. Перед началом работ необходимо провести пробную запись радарограммы на выбранной территории, с целью идентификации помех (в частности, уровня записи воздушных волн) и определения выбора параметров измерений.

Рекомендуемые значения параметров измерений, с целью выделения полезных сигналов (отраженных от искомых объектов) на фоне других (помехи, шумы) и более точного определения точечных и протяженных объектов на радарограммах:

- количество точек по глубине – 511 (максимальное качество на большие глубины, можно использовать 255, но только при оперативной поисковой работе);

- накопление – 20 (стандартное 8-16, увеличение позволяет выявлять более слабые сигналы, увеличивает глубину зондирования, но при этом замедляется рекомендуемая скорость перемещения прибора во время записи профиля);

- шаг зондирования – 200 мм (среднее значение, однако, его можно менять в зависимости от задач, например, при исследовании территории под строительство зданий и сооружений можно установить минимальные значения для поиска локальных объектов; при проведении работ в вулканических районах для обнаружения пепловых слоев, можно увеличить параметр);

- количество точек по профилю – 2000 (можно менять, но учитывая, что параметр должен быть в полтора раза больше величины равной отношению длины профиля к шагу зондирования);

- сдвиг – 8-9 м;

- развертка по глубине – 200 нс (изменяется ступенчато, если в нижней части радарограммы отсутствует область шумов, можно увеличить значение);

- скорость прохождения профиля – 1.2 км/ч.

- режим сканирования – “По перемещению” (учитывается работа датчика перемещения);

- эpsilon – 30 (значение диэлектрической проницаемости “Сухо”-7, “Влажно”-20, “Вода”-80 – берется среднее значение; устанавливается приблизительно, исходя из априорной информа-

ции зондируемой среды; более точно рассчитывается по полученной радарограмме).

Необходимо учитывать особенности рельефа и поверхности, по которой будут перемещаться приборы в зоне исследования. Это связано с некоторыми характеристиками приборов (их масса: «ОКО-250» – 10 кг; габариты в собранном виде: «ОКО-250» – 1100х430х130 (мм)). В связи с этим измерения можно провести или по серии магистральных и площадных профилей, или же по отдельным профилям разной длины несвязанным друг с другом.

§2.2. Методика обработки и интерпретации данных радарограмм

Анализ радарограмм начинается с выделения осей синфазности отраженных волн, которые не связаны с наличием реальных границ в разрезе, а являются волнами-помехами (воздушные, кратные и неполнократные отражения). Для удаления помех применяется ряд процедур: частотная фильтрация с использованием разного рода фильтров (полосовой и режекторный, горизонтальный полосовой, медианный); выделение контура; сглаживание или обострение сигнала; вычитание среднего. Все процедуры проводятся в модуле обработки файлов программы GeoScan32. Пример такой обработки можно привести на двух профилях общей протяженностью 156 м, выполненных автором в городе Петропавловск-Камчатский с целью уточнения грунтовых условий для строительства жилых домов (рис. 2.4, 2.5).

Волновая картина на радарограммах по двум профилям представлена волнами дифракции (рис. 2.5). В модуле обработки файлов программы GeoScan32 проведено: выделение контура; обострение сигнала; вычитание среднего. Выявлен строительный мусор до глубины 2 м, что подтвердилось данными бурения. Данный слой непригоден для закладки фундамента здания, эти грунты подлежат удалению.

После обработки файлов в программе GeoScan32 радарограммы интерпретируются с целью получения максимально полной информации о геологическом строении объекта исследования.



Рис. 2.4. Схема расположения георадиолокационных профилей:
1-2 – профиль 1 (76 м); 3-4 – профиль 2 (80 м). Космический снимок
Image Landsat, Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO www.earth.google.com

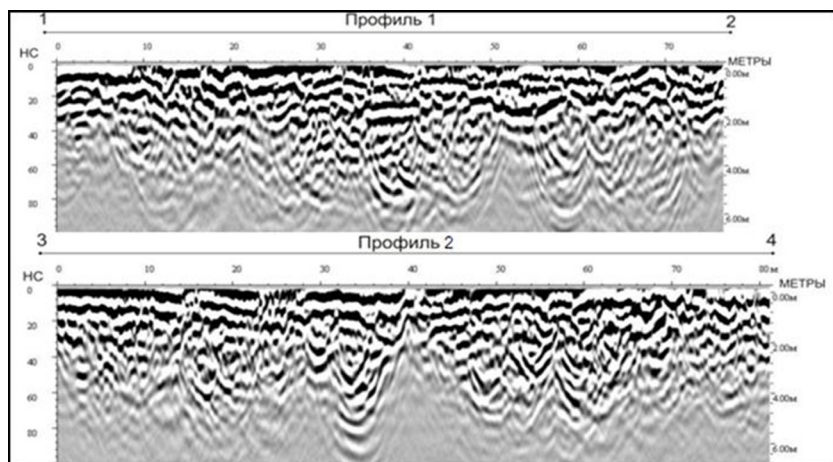


Рис. 2.5. Радарограммы по профилям на территории района «Электрон»
(город Петропавловск-Камчатский)

С этой целью привлекают имеющуюся геологическую информацию об объекте (карты, разрезы по скважинам) (пример обработки представлен в приложении 1). Для каждого выделенного геологического слоя производится подсчет значений скорости распространения электромагнитной волны V (см/нс) в точках профиля, соответствующих положению скважин, с учетом отношения толщины слоя $2H$ (см) и времени прихода отраженной волны t (нс). Затем, для каждого слоя, рассчитывается значение диэлектрической проницаемости E с учетом уже рассчитанной скорости электромагнитной волны V в данной точке ($30/V$)² [36, 40, 85; 28 с., 100; с. 42-52]. Пример такой обработки представлен на двух профилях, выполненных автором в городе Петропавловск-Камчатский с целью уточнения грунтовых условий для строительства нового стадиона «Спартак» и реконструкции близлежащей территории (рис. 2.6, 2.7).



Рис. 2.6. Схема расположения георадиолокационных профилей:
1-2 – профиль 1 (52 м); 3-4 – профиль 2 (39 м); I – скважина С-5329/15;
II – скважина С-5332/20. Космический снимок Image Landsat,
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO www.eart.google

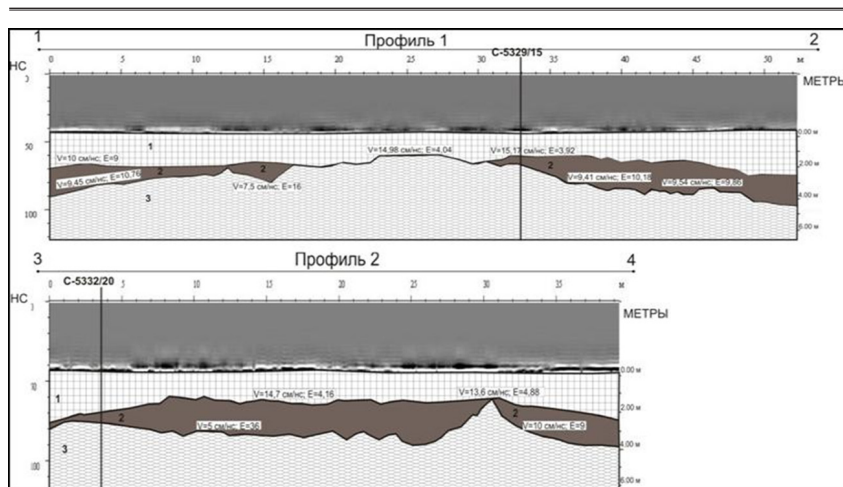


Рис. 2.7. Радарограммы по профилям на территории стадиона «Спартак» (г. Петропавловск-Камчатский). Геологическое описание (пояснение в тексте)

Профиль 1 (рис. 2.7): Геологическая привязка к скважине №5329: 1 слой – насыпной щебенистый грунт. Скорость электромагнитной волны (ЭМВ) $V_{эмв} = 10\text{--}15.17$ см/нс; $E = 3.92\text{--}9$ соответствует подошве слоя. Двойное время прихода отраженной волны около 70 нс. Мощность слоя меняется от 2 до 3 м. Оси синфазности отраженных электромагнитных волн на временных разрезах расположены горизонтально, что свидетельствует о горизонтальном расположении границ в разрезе. 2 слой – ил черный текучий заторфованный. Скорость ЭМВ варьирует от 7.5 (водонасыщенный участок на расстоянии около 15 м от начала профиля) до 9.54. Характерны небольшие изменения значений диэлектрической проницаемости 9.86 до 16. Двойное время прихода отраженной волны до 88 нс. Мощность слоя меняется в пределах от 0.5 до 2.9 м. 3 слой – щебенистый грунт с песчаным заполнителем, насыщенный водой. К сожалению, на радарограмме не прослеживаются оси синфазности.

Профиль 2 (рис. 2.7): Геологическая привязка к скважине №5332: 1 слой – насыпной щебенистый грунт. Скорость электромагнитной волны (ЭМВ) $V_{эмв} = 13.6\text{--}14.7$ см/нс; $E = 4.16\text{--}4.88$ соот-

ветствует подошве слоя. Двойное время прихода отраженной волны около 65 нс. Мощность слоя меняется от 2 до 3 м. Оси синфазности отраженных электромагнитных волн на временных разрезах расположены горизонтально, что свидетельствует о горизонтальном расположении границ в разрезе. 2 слой – ил черный текучий заторфованный, с обломками стекла (намывной грунт). Мощность меняется от 0.5 до 2.5 м. На глубине порядка 3.5 м (по радарограмме, по скважине – 2.7 м) залегают грунтовые воды, которые выделяются четкой протяженной осью синфазности и $V_{эмв} = 5$ см/нс; $E = 36$. 3 слой – щебенистый грунт с песчаным заполнителем, насыщенный водой.

При интерпретации данных георадиолокации сложных объектов необходимо учитывать, что есть отложения, в которых содержание флюида (например, воды) может меняться, что приводит к изменению диэлектрической проницаемости. Согласно работам А.А. Воробьева [25; с. 77-80, 26; с. 213-221], М.Б. Гохберга [32; 174 с.], Э.И. Пархоменко [77; 164 с.], А.В. Старовойтова [100; с. 42-52], Л.Л. Федорова [107; с. 72-76], М.П. Федорова [108; с. 337-338], установлено, что экспериментальные значения диэлектрической проницаемости у разных сред варьируют в широких диапазонах. Вода (пресная и морская) – 81, песок сухой – 2.93, песок с 1.5% воды – 5, с 3.0% воды – 11, с 4.5% воды – 39.1, глина – от 2.4 до 18.6 (при влажности от 0 до 16%). В то же время, экспериментальные значения скорости распространения электромагнитной волны в этих средах имеют следующие значения: вода (пресная и морская) – 3.3 см/нс, песок сухой – 17, песок с 1.5% воды – 13, с 3.0% воды – 9, с 4.5% воды – 5, глина – от 19 до 7 см/нс (при влажности от 0 до 16%). Таким образом, с увеличением влажности грунтов увеличиваются значения диэлектрической проницаемости и, соответственно, уменьшаются скорости распространения электромагнитной волны. Исходя из этих данных, можно интерпретировать полученные радарограммы с выделением на них геологических слоев.

В соответствии с работами авторов О.В. Лунина [69; с. 1616-1633], А.В. Старовойтова [100; с. 42-52], Н.Г. Хатиашвили [112; с. 13-19],

P.L. Baker [121; p. 19-22], Csaba Ekes [129; p. 199-217] на радарограммах можно выделять георадарные фации. Пример такого выделения представлен на тех же двух георадарных профилях общей протяженностью 91 м, полученных автором на территории стадиона «Спартак» города Петропавловск-Камчатский (рис. 2.8).

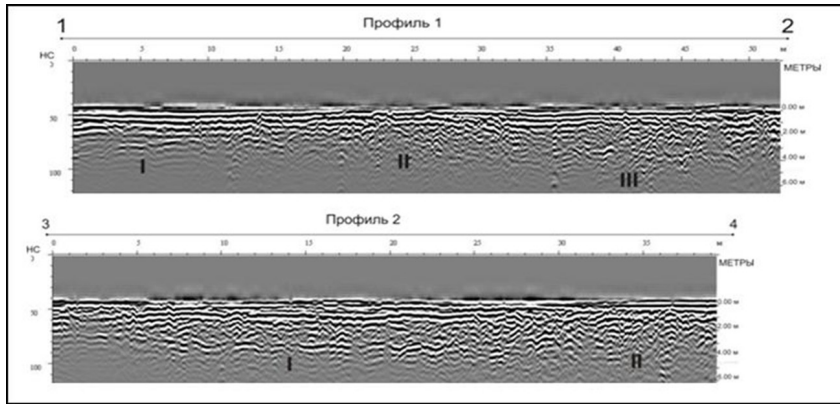


Рис. 2.8. Радарограммы по профилям на территории стадиона «Спартак» (г. Петропавловск-Камчатский).

Пример выделения георадарных фаций (пояснение в тексте)

Можно выделить участки, на которых наблюдается смена георадарных фаций обусловленных изменением конфигурации осей синфазности отраженных волн, их интенсивностью и протяженностью, а также изменением скорости распространения электромагнитной волны V , степенью влажности отложений и неоднородным литологическим строением толщ. Вертикальное расчленение разреза связано с особенностями волновой картины: На профиле 1 можно выделить 3 участка на которых наблюдается смена георадарных фаций (рис. 2.8): I – субгоризонтальное наклонное расположение осей синфазности; II – субгоризонтальное хаотическое расположение осей синфазности; III – хаотическое расположение осей синфазности, наличие дифракций, обусловленных наличием строительного мусора, бетона, обрезков древесины (по данным

скважины). На профиле 2 можно выделить 2 участка, на которых наблюдается смена георадарных фаций (рис. 2.8): I – субгоризонтальное хаотическое расположение осей синфазности; II – хаотическое расположение осей синфазности, наличие дифракций, обусловленных наличием строительного мусора, песка дресвяного с обломками стекла (по данным скважины).

Выводы по главе 2

1. Предварительное ознакомление с особенностями строения и вещественного состава отдельных участков территории исследуемых объектов Камчатки определило необходимость постановки экспериментальных измерений георадарной съемки для определения основных регулируемых параметров приборов, определяющих разрешающую способность метода.

2. Выполнены экспериментальные измерения с помощью георадара «ОКО-250», что позволило определить оптимальные параметры настройки прибора: количество точек по глубине – 511; накопление – 20; шаг зондирования – 200 мм; количество точек по профилю – 2000; сдвиг – 8-9 м; развертка по глубине – 200 нс; скорость прохождения профиля – 1.2 км/ч; режим сканирования «по перемещению». Эти параметры позволяют получить более точные и достоверные данные о зондируемой среде.

3. На стадии обработки и интерпретации полученных экспериментальных данных была опробована методика, основанная на программном комплексе GeoScan32. Удаление помех и введение поправок позволило более точно определять скорость распространения электромагнитной волны V и диэлектрической проницаемости ϵ , а также выделять георадарные фации. Применение данной методики позволяет точно и достоверно интерпретировать радарограммы и изучать грунтовые условия на Камчатке.

ГЛАВА III

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ НА КАМЧАТКЕ

§3.1. Особенности строения осадочной толщи долины реки Авача

На данной территории (рис. 3.1) в случае сильного землетрясения следует ожидать разрушения инфраструктуры и части дорожного полотна, связывающих г. Петропавловск-Камчатский с другими населенными пунктами.

Более того, детальные исследования на рассматриваемом участке не проводились уже много лет, хотя их необходимость обуславливается сменой нормативной, исходной сейсмичности в Елизовском районе в связи с утверждением новых карт общего сейсмического районирования (ОСР – 97) территории России.

Помимо метода георадиолокации, проведены сейсморазведочные и электроразведочные работы (приложение 2 и 3). По параметру глубины исследований методы георадиолокации и сейсморазведки перекрываются в области 2 – 10 метров. При этом георадиолокация обеспечивает более высокую разрешающую способность в верхней части разреза, тогда как сейсморазведка обеспечивает просвечивание нижней части разреза и на больших глубинах. С помощью георадарного просвечивания видно локализацию мелких и замкнутых неоднородностей, распространенных в приповерхностной части разреза грунтов, которые недоступны сейсморазведке. Для обоих методов значения их основных параметров определяются в большинстве случаев одними и теми же причинами – структурой, текстурой пород, их обводненностью и другими причинами, имеющими природное или техногенное происхождение.

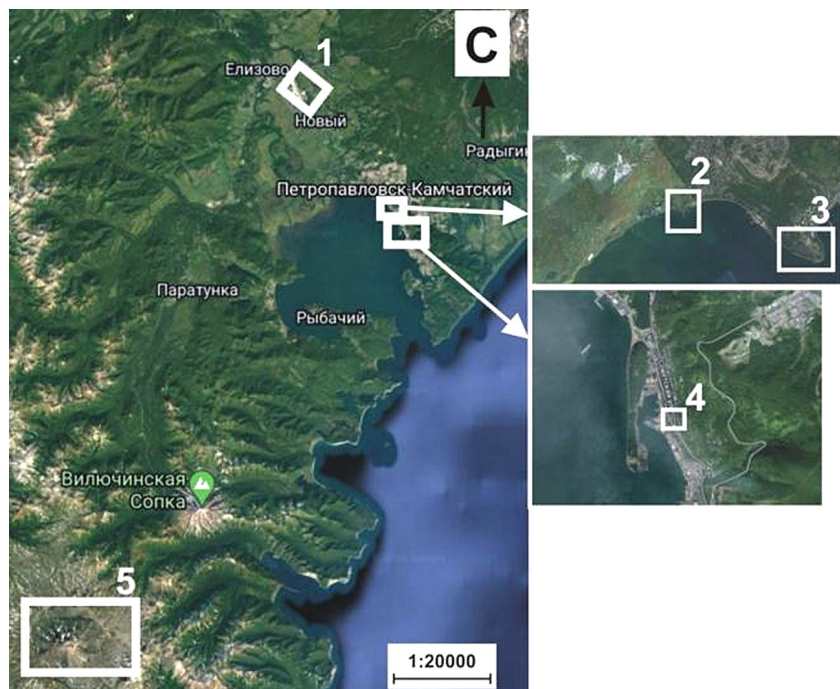


Рис. 3.1. Общая схема расположения некоторых объектов исследования на карте (Камчатка): 1 – долина реки Авача; 2 – берег бухты Моховая; 3 – мыс Чавыча; 4 – здание на побережье Авачинской губы (Краеведческий музей); 5 – вулкан Горелый)

Различия в степени контрастности среды и различия в степени затухания упругих и электромагнитных волн определяют различия в структуре волновых полей и, как следствие, методические возможности каждого из методов. При изменении влажности в песках на 10-15% кинематика и динамика электромагнитных волн изменяется весьма значительно за счет изменения условий поляризации, проводимости и диэлектрической проницаемости. В то же время, такое изменение влажности не приводит к существенным изменениям упругих характеристик среды и не вызывает заметных изменений в кинематике и динамике сейсмических волн.

В результате проведения георадиолокационного профилирования были получены радарограммы по профилю № 1 и № 2 (рис. 3.2).

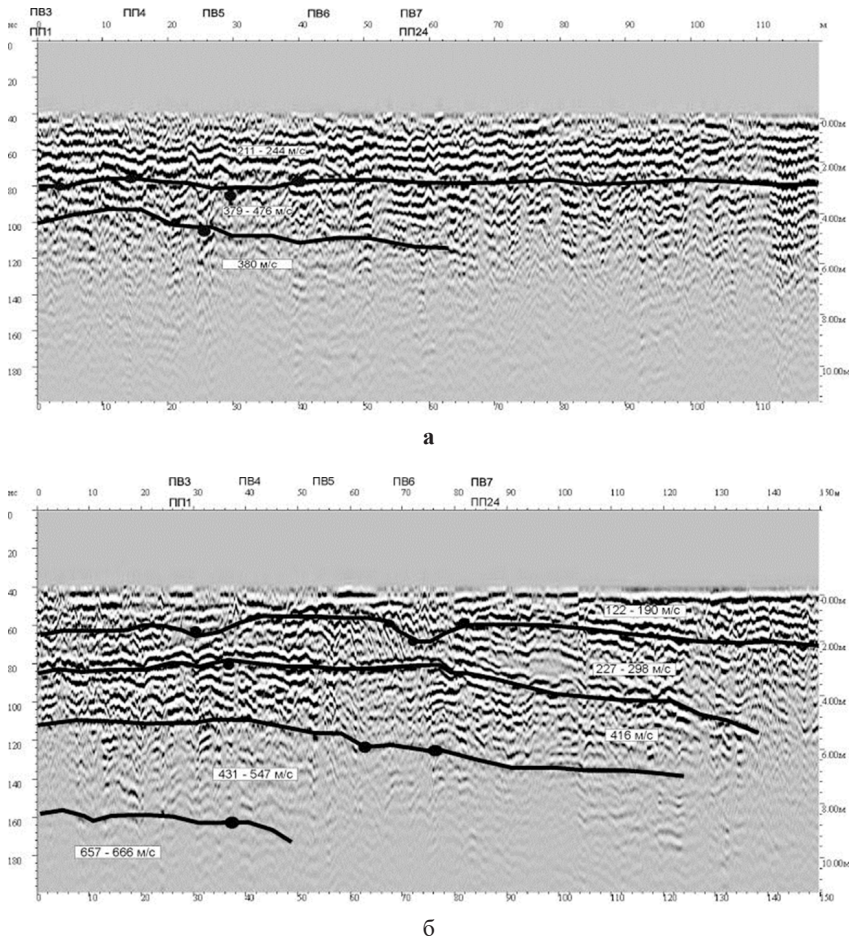


Рис. 3.2. Сопоставление сейсмического разреза и радарограммы по профилю № 1 (а) и № 2 (б) Черными линиями обозначены сейсмогеологические границы; цифрами в слое – скорости продольных волн в м/с; ПВ 3 – ПВ 7 – пункт возбуждения упругих колебаний; ПП 1 – ПП 24 – пункт приема сигнала. По горизонтали отложено расстояние в метрах, по вертикали (слева) – шкала радарограммы в нс, по вертикали (справа) – абсолютная глубина в метрах

По корреляции осей синфазности на радарограмме по профилю № 1 можно уверенно выделить 2 границы (описание сверху вниз). Первая граница регистрируется на временах порядка 80 нс, что соответствует глубине около 3 м при скорости распространения электромагнитной волны $V = 3.75$ см/нс и диэлектрической проницаемости $E = 64$. При сопоставлении инженерно-геологического разреза (рис. 3.3) на данной глубине залегают крупнозернистые пески. Вторая граница регистрируется на временах порядка 100 нс, что соответствует глубине около 4 м при скорости распространения электромагнитной волны $V = 5$ см/нс и диэлектрической проницаемости $E = 36$. По корреляции осей синфазности на радарограмме профиля № 2 можно выделить 4 границы (описание сверху вниз). Первая граница регистрируется на временах порядка 50-60 нс, что соответствует глубине около 2 м, скорость распространения электромагнитной волны $V = 4$ см/нс, диэлектрическая проницаемость $E = 56$. Вторая граница регистрируется на временах порядка 80 нс, которая соответствует глубине около 3 м и постепенно погружается до глубины 5 м, скорость распространения электромагнитной волны $V = 3.75$ см/нс, а диэлектрическая проницаемость $E = 64$. Третья граница регистрируется на временах порядка 110 нс, что соответствует глубине около 6 м и постепенно погружается до глубины около 7 м, при скорости распространения электромагнитной волны $V = 5.4$ см/нс, диэлектрическая проницаемость $E = 30$. Четвертая граница просматривается на временах порядка 160 нс. Это соответствует глубине около 9 м при скорости распространения электромагнитной волны $V = 5.6$ см/нс и диэлектрической проницаемости $E = 28$.

По данным сейсморазведки скорости рыхлых отложений с поверхности и до глубины 5 м варьируют в пределах 122 м/с – 476 м/с. Скорости продольных волн в галечниковых отложениях изменяются в зависимости от процентного содержания заполнителя и показателя влажности. На глубине ниже 10 метров значения скоростей продольных волн изменяются от 714 м/с до 833 м/с. Так при заполнении песком и супесью до 30% маловлажные галечниковые отложения имеют скорости продольных волн $V_p = 740$ м/с.

Инженерно-геологический разрез II.

Условные обозначения:

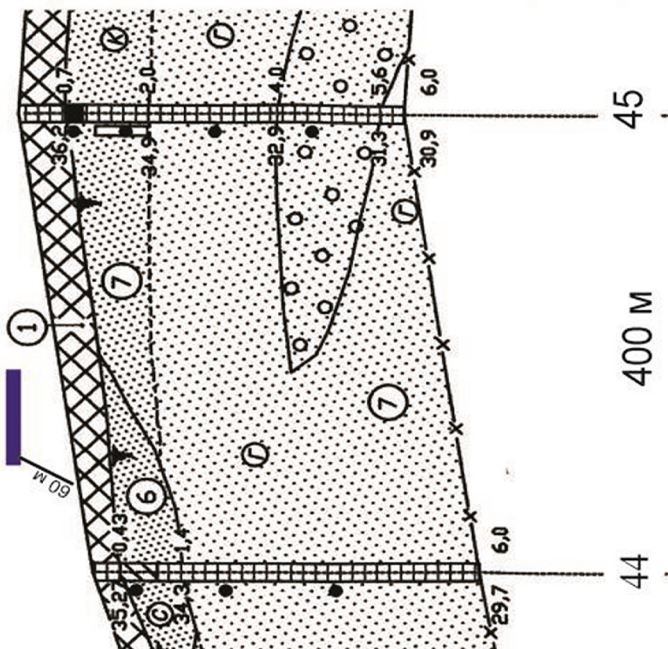
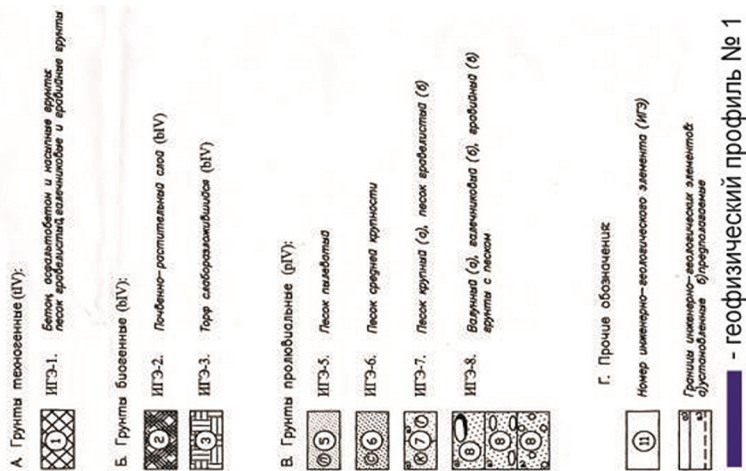


Рис. 3.3. Инженерно-геологический разрез II

Необходимые пески средней крупности имеют скорости продольных волн $V_p = 666$ м/с. Нижний слой коренных пород со скоростью сейсмических волн $V_p = 2500$ м/с залегает на глубине 25 – 30 м на первом и втором профиле соответственно. Результаты электро-разведочных работ хорошо согласуются с сейсмическим разрезом по профилю № 2. Подтверждается предположение о большой глубине залегания грунтовых вод.

В результате выполнения сейсморазведочных работ в комплексе с георадиолокационным профилированием стало возможным более уверенно судить о строении приповерхностной части разреза рыхлых отложений левобережья долины реки Авача (рис. 3.3).

Полученные результаты использованы для реконструкции и строительства зданий на территории, где расположены объекты повышенной социальной значимости.

§3.2. Изучение обвально-взрывных отложений Авачинского вулкана на берегу бухты Моховая

Северная часть города Петропавловска-Камчатского и населенные пункты между краевым центром и г. Елизово расположены на лавинных отложениях обвально-взрывного происхождения, сформировавшихся в конце плейстоцена при разрушении постройки Древнего Авачинского вулкана (рис. 3.4).

Значительные объем ($16 - 20$ км³), высота скатывания $H (> 3$ км) и длина пробега L (около 30 км) при обычном для таких обломочных лавин значении отношения $H/L = \sim 0,10$ вызывают большой интерес к исследованию их строения и состава. Необходимо уточнить пространственное распределение различных литологических типов отложений, слагающих холмы и западины на поверхности лавины. Помимо теоретического значения (уточнение генетических особенностей формирования отложений), решение этого вопроса имеет важное практическое значение, т.к. определяет планировочные ограничения в размещении зданий и сооружений. Исследования проведены на берегу бухты Моховая (рис. 3.5, 3.6).

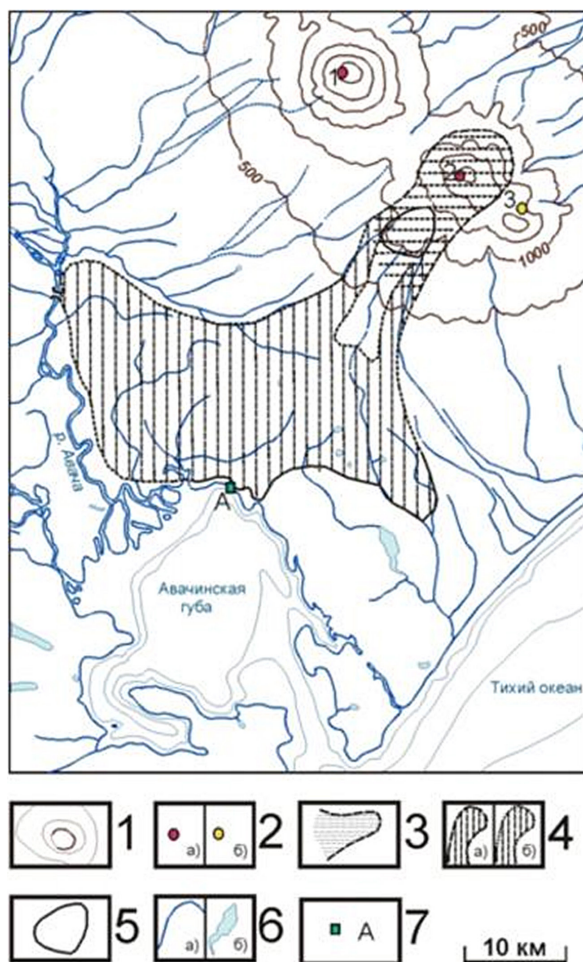


Рис. 3.4. Схема площадного распространения обвалово-взрывных отложений Древнего Авачинского вулкана: 1 – рельеф Авачинско-Корякской группы вулканов (1 – Корякский вулкан, 2 – Авачинский вулкан, 3 – Козельский вулкан); 2 – кратеры вулканов действующих (а) и угасших (б); 3 – обвалово-взрывной кратер Древнего Авачинского вулкана; 4 – обвалово-взрывные отложения Древнего Авачинского вулкана, выходящие на поверхность (а) и перекрытые более молодыми рыхлыми отложениями (б); 5 – скальный оползень, сползший при обрушении вершины Древнего Авачинского вулкана; 6 – изобаты, реки (а) и озёра (б); 7 – границы площадки детальных работ

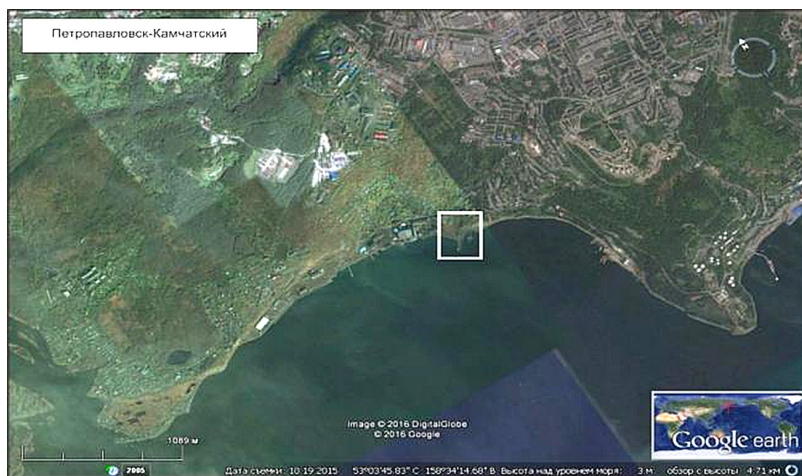


Рис. 3.5. Общая схема расположения участка исследований (космический снимок Image Landsat, Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO [www.earth.google](http://www.earth.google.com))



Рис. 3.6. Детальная схема участка работ (космический снимок Image Landsat, Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO [www.earth.google](http://www.earth.google.com)): точки 1-6 – георадиолокационные профили; скв. №1778 и т.п. – скважина и ее номер

Профиль 1-2 (протяженность 120 м) (рис. 3.6). На рисунке 3.7 проведено сопоставление георадиолокационного разреза по профилю 1-2 со скважинами №1777 (пробурена 16.01.2015) и 1776 (пробурена 16.01.2015), что позволяет проводить геологическую интерпретацию радарограммы.

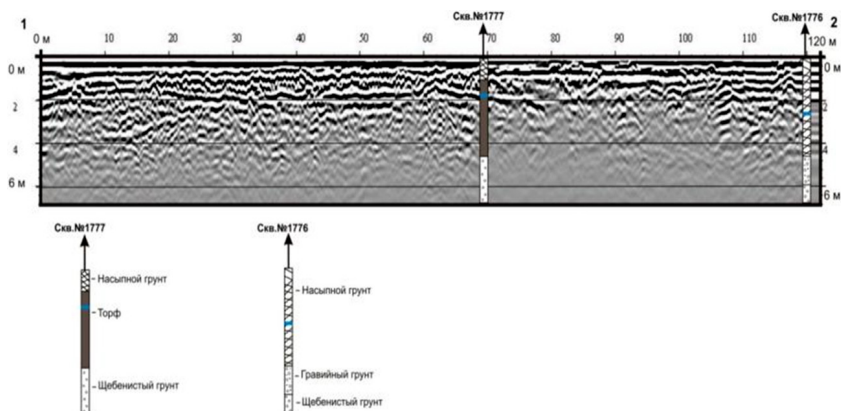


Рис. 3.7. Георадиолокационный профиль 1-2: цифры 1 и 2 – направление профиля (смотрите рис. 4); горизонтальная шкала 0 – 120 м – расстояние в метрах; вертикальная шкала 0 – 6 м – глубина в метрах; скв.№1777 и 1776 – номера скважин (смотрите пояснения в тексте)

До глубины 1.20 м, мощностью 1.20 м залегает насыпной грунт (дресва, щебень, глыбы) с песчаным заполнителем, уплотненный. К концу профиля (120 м) мощность этих отложений увеличивается до глубины 4.60 м. Возраст и генезис пород – Q_4t . На радарограмме отмечается в виде горизонтального расположения осей синфазности. На глубине 1.50 м – грунтовые воды. К концу профиля (120 м) уровень грунтовых вод наблюдается на глубине 2.50 м. Следующий слой, до глубины 4.70 м, мощностью 3.50 – торф слабо разложившийся, светло-коричневого цвета, водонасыщенный. Возраст и генезис пород – Q_4b . Водонасыщенность данного слоя на радарограмме отмечается в виде затухания отраженных волн. Далее, до глубины 10.50 м, мощностью 5.80 залегает щебенистый грунт,

мощность его в конце профиля увеличивается до 9.20 м, заполнитель – песок пылеватый (15-20%), маловлажный, с включениями глыб (15-20%). Возраст и генезис пород – Q_4e1 . До глубины 16 м, мощностью 5.50 м обнаружен скальный грунт – сильно трещиноватый, выветрелый, средней прочности, неразмягчаемый. Возраст и генезис пород – $N_2-Q_{2,3}$. Стоит отметить по данным скважины №1776, до глубины 5.90 м, мощностью 1.30 залегает гравийный грунт, заполнитель – песок средней крупности 30 – 35%, серого цвета, водонасыщенный. Возраст и генезис пород – Q_4m-al .

Профиль 3-4 (протяженностью 120 м) (рис. 3.6). На рисунке 3.8 проведено сопоставление георадиолокационного разреза по профилю 3-4 со скважиной №1776. На поверхности залегает насыпной щебенистый грунт (песок, дресва, щебень) с супесчаным заполнителем, уплотненный.

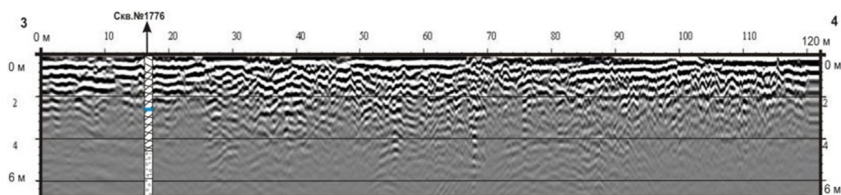


Рис. 3.8. Георадиолокационный профиль 3-4: цифры 3 и 4 – направление профиля (смотрите рис. 4); горизонтальная шкала 0 – 120 м – расстояние в метрах; вертикальная шкала 0 – 6 м – глубина в метрах; скв.№1776 – номер скважины (смотрите пояснения в тексте)

Профиль 5-6 (протяженностью 120 м) (рис. 3.6). На рисунке 3.9 проведено сопоставление георадиолокационного разреза по профилю 5-6 со скважинами №17590 (пробурена 29.07.1981) и 87001 (пробурена 06.01.1987). До глубины 7.00 м, мощностью 7.00 м залегает насыпной грунт – валуны андезита с песком до 5%. Возраст и генезис пород – Q_4t . Данный слой на радарограмме выделяется только до около 2.5 м. На глубине 1.50 м – грунтовые воды. Следующий слой, до глубины 15.00 м, мощностью 8.00 – щебенистый грунт с супесью желтой, твердой, с глыбами андезитов и кремнистых сланцев размером 0.3 – 0.4 м. Возраст и генезис по-

род – K_2e-d . На расстоянии около 100 м до глубины 6.20 м, мощностью 6.20 м залегает насыпной щебенистый грунт с супесью, 15 – 30 %, с отдельными глыбами пород. С глубины 0.9 м грунт водонасыщенный. Возраст и генезис пород – Q_4t . На глубине 0.90 м – грунтовые воды. Следующий слой, до глубины 7,40 м, мощностью 1.20 – насыпной щебенистый грунт с отдельными глыбами пород, с прослоями ила суглинистого и песка мелкого. Возраст и генезис пород – Q_4t . Далее, до глубины 10.20 м, мощностью 2.80 залегает песок пылеватый, заиленный, водонасыщенный. Возраст и генезис пород – Q_4m . До глубины 13.20 м, мощностью 3.00 м обнаружен крупноглыбовый грунт с супесью 10%, с включениями щебня и дресвы. Возраст и генезис пород – K_2e .

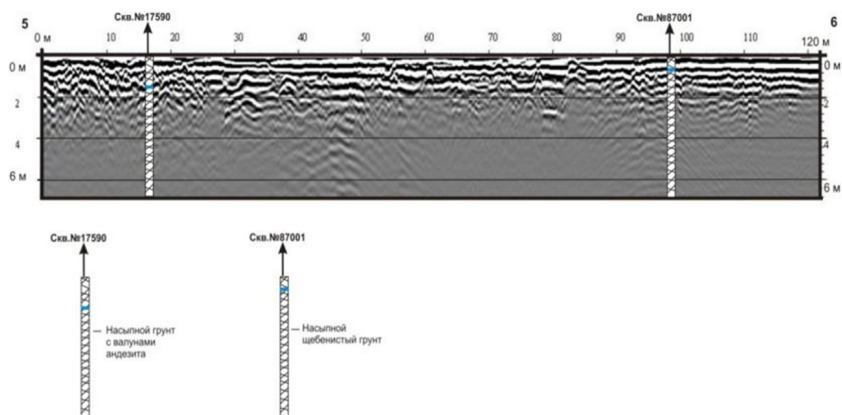


Рис. 3.9. Георадиолокационный профиль 5-6: цифры 5 и 6 – направление профиля (смотрите рис. 4); горизонтальная шкала 0 – 120 м – расстояние в метрах; вертикальная шкала 0 – 6 м – глубина в метрах; скв.№17590 и 87001 – номера скважин (смотрите пояснения в тексте)

Профиль 7-8 (протяженностью 65 м) (рис. 3.6). На рисунке 3.10 проведено сопоставление георадиолокационного разреза по профилю 7-8 со скважиной №87003 (пробурена 09.01.1987). До глубины 4.80 м, мощностью 4.80 м залегает насыпной щебенистый грунт – щебень, металл, мусор. Грунт перемешан с морскими от-

ложениями. Возраст и генезис пород – Q_4t . На глубине 2.80 м – грунтовые воды. Следующий слой, до глубины 7.50 м, мощностью 2.70 – песок пылеватый, серый, водонасыщенный. Возраст и генезис пород – Q_4m . До глубины 16.50 м, мощностью 10.00 м обнаружен дресвяный грунт с прослоями суглинка. Возраст и генезис пород – K_2e .

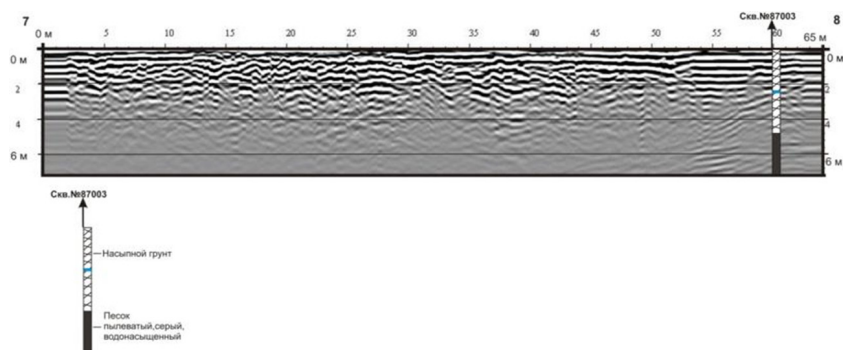


Рис. 3.10. Георадиолокационный профиль 7-8: цифры 7 и 8 – направление профиля (смотрите рис. 4); горизонтальная шкала 0 – 65 м – расстояние в метрах; вертикальная шкала 0 – 6 м – глубина в метрах; скв.№87003 – номер скважины (смотрите пояснения в тексте)

Профиль 9-10 (протяженность 23 м) (рис. 3.6). На рисунке 3.11 проведено сопоставление георадиолокационного разреза по профилю 9-10 со скважинами №1778 (пробурена 16.01.2015). До глубины 3.00 м, мощностью 3.00 м залегает насыпной грунт (дресва, щебень, глыбы) с песчаным заполнителем, уплотненный. Возраст и генезис пород – Q_4t . На глубине 2.50 м – грунтовые воды. Следующий слой, до глубины 4.60 м, мощностью 1.60 – торф слабо разложившийся, светло-коричневого цвета, водонасыщенный. Возраст и генезис пород – Q_4b . До глубины 7.80 м, мощностью 1.30 м находится суглинок мягкопластичный, слабо заторфованный, светло-коричневого цвета. Возраст и генезис пород – Q_4al . До глубины 7.80 м, мощностью 1.30 м – гравийный грунт, с включениями валунов (5-10%), заполнитель – песок средней крупности 30 – 35%,

серого цвета, водонасыщенный. Возраст и генезис пород – Q4m-a1. Далее, до глубины 11.80 м, мощностью 4.00 м залегает щебенистый грунт, заполнитель – песок пылеватый (15-20 %), маловлажный, с включениями глыб (15-20 %). Возраст и генезис пород – Q4e1. До глубины 16 м, мощностью 5.00 м обнаружен скальный грунт – сильно трещиноватый, выветрелый, средней прочности, неразмываемый. Возраст и генезис пород – N₂-Q₂₋₃.

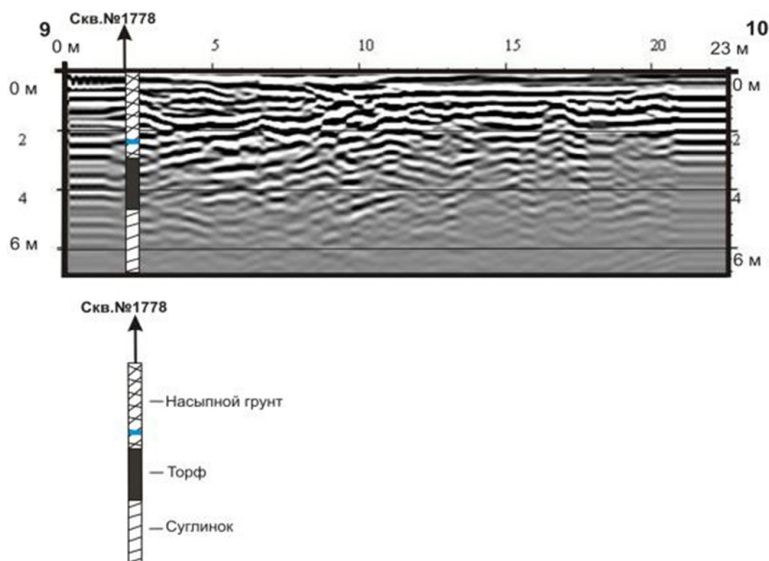


Рис. 3.11. Георадиолокационный профиль 9-10: цифры 9 и 10 – направление профиля (смотрите рис. 4); горизонтальная шкала 0 – 23 м – расстояние в метрах; вертикальная шкала 0 – 6 м – глубина в метрах; скв. №1778 – номер скважины (смотрите пояснения в тексте)

Практически повсеместно рассматриваемые отложения перекрыты чехлом (мощностью от 0.5 до около 10 м) более молодых четвертичных отложений, которые хорошо выделяются на радарограммах. В строении западин участвуют преимущественно дресвяно-щебенистые отложения с включением отдельных глыб. В долине ручьев обнажились отложения торфа. Ближе к склону на поверхно-

сти залегает дресвяно-щебенистый уплотненный грунт. В сторону океана его мощность увеличивается, грунт перемешивается с морскими отложениями. Далее преимущественно на поверхность выходят валуны андезита с песком до 5% (рис. 3.12).



Рис. 3.12. Схема распространения рыхлых четвертичных отложений на берегу бухты Моховая (Q_{4t}): 1 – дресвяно-щебенистый грунт; 2 – дресвяно-щебенистый грунт с морскими отложениями; 3 – дресвяно-щебенистый грунт с валунами андезита с песком до 5%

Полученные результаты использованы для планирования реконструкции и строительства зданий на территории исследования.

§3.3. Уточнение оползневой опасности на мысе Чавыча

В морфотектоническом отношении территория работ расположена на северном окончании Петропавловского горста, на границе его с тектонической депрессией Авачинской бухты. Горст имеет

глыбово-клавишное строение, в котором относительно приподнятые блоки (горсты второго порядка) чередуются с опущенными (грабены второго порядка). Участок расположен на приподнятом блоке (горст второго порядка) мыса Чавыча. Горст граничит с расположенным к северо-западу грабеном второго порядка бухты Моховая, и к юго-востоку – грабеном бухты Сероглазка.

Территория района исследований располагается на выровненной вершинной поверхности горста, и в геоморфологическом отношении представляет собой слабо всхолмленную аккумулятивную поверхность, сформированную накоплением техногенных, делювиально-пролювиальных отложений, накопившихся на речных террасах, врезаемых в склоны горста. В формировании первичного рельефа принимали активное участие вулканогенные, денудационные и аккумулятивные процессы, а также тектоника и неотектоника. Раннекайнозойские тектонические движения привели к формированию моноклиналильного залегания слоев в скальном основании горста, а в последующем сформировалась система разрывов, пересекающих эти слои. В рельефе они не проявлены, однако определяют структуру эрозионного расчленения территории, особенно в прибрежной зоне (рис. 3.13).



Рис. 3.13. Соотношение рельефа с дизъюнктивной тектоникой

Вдоль крупных разрывов (красные параллельные линии со штриховкой) сформировались грабенообразные понижения. По серии более мелких трещин (толстые красные линии), в целом параллельных берегу, происходит отседание с раскрытием трещин до 10 см и более. Другие трещины (тонкие красные линии) предопределили ступенчатый характер поверхности скальных пород, что обусловило сложный рельеф подошвы рыхлых отложений. Денудация при этом играла нивелирующую и одновременно рельефообразующую роль, с последующей эрозией и образованием плавных форм рельефа.

Морские террасы врезаны в борта горста Моховая, не исключено, что и вершинная поверхность горста также является морской террасой. Западную часть района ограничивает побережье Авачинской губы (на участке между бухтами Моховая и Сероглазка), водами которого идет переработка берега, образуя волноприбойные террасы, формируя пляжный микрорельеф.

На территории участка расположены производственные сооружения, при их строительстве выполнена планировка территории насыпными грунтами (рис. 3.14).

В вертикальном строении горста Чавыча выделяются два структурных яруса. Нижний структурный ярус сложен породами верхнего мела. На них с угловым и стратиграфическим несогласием залегают отложения верхнего структурного яруса, представленные полигенными четвертичными отложениями. Верхнемеловой (кампанский) возраст пород нижнего структурного яруса подтвержден по комплексу радиолярий в пробах, отобранных из этих пород в обрывах бухты Моховая [90].

Стратиграфическое положение отложений до настоящего времени является спорным. По мнению ряда специалистов, породы относятся к валагинской толще (K_2vi) верхнего мела, по мнению других – они относятся к нижней части никольской толщи верхнего мела (K_2nk). В разрезе отложений в береговых обрывах отмечается чередование базальтов с пачками переслаивания псаммитовых, алевроитовых туфов и туфосилицитов мощностью от 1.5 – 3 м, редко до 20, а также единичные прослои агломератовых туфов до 10 м. Породы метаморфизованы в зеленокаменной фации метаморфизма.



Рис. 3.14. Выровненная поверхность, сложенная насыпными грунтами (западная граница иловых полей)

Дизъюнктивная тектоника территории изучена слабо. В целом она определяется наличием разлома северо-западного простирания, отделяющего приподнятые блоки Петропавловского горста (в том числе горст второго порядка Чавыча) от депрессии Авачинской бухты. Непосредственно на рассматриваемой территории специализированные работы по изучению дизъюнктивной тектоники не проводились. В береговых обрывах хорошо заметны трещины (рис. 3.15), имеющие преимущественно северо-восточное и северо-западное простирание, подчиненное значение имеют трещины субширотного и субмеридионального простирания.

При описании керна скважин скальные грунты определены как диабазы, зеленовато-серого цвета, сухие, слабо трещиноватые, прочные. По данным бурения скважин, глубина залегания кровли скальных пород – от 4.5 до 7.7 м, отметка кровли – от 14.1 до 30.2 м, и мощность перекрывающих пород (мощность вскрывающих) – от 4.5 до 7.7 м.



Рис. 3.15. Зияющие трещины отрыва отседания (показаны красными стрелками) в береговом обрыве у основания гидрографического створа.
Красными линиями показаны трещины напластования

На карте сейсмического микрорайонирования г. Петропавловска-Камчатского 1974 г. [55; с. 61-70, 59; с. 232-236, 93] изученная площадка расположена в западной части города в пределах зон с сейсмической опасностью VIII, IX и X баллов.

К VIII-балльной зоне отнесены районы с лучшими в сейсмическом отношении грунтами. Это районы сопки Мишенной, Безымянной, Зеркальной, Петровской, Никольской и некоторых безымянных сопки в юго-западных и южных частях города. Грунты этих участков представлены скальными породами, выходящими на поверхность или покрытыми слоем наносов 3-5 м, уровень грунтовых вод ниже 5 м, а также сухой галечниковой террасой на северо-восточном склоне сопки Мишенной.

К IX-балльной зоне отнесены участки, опоясывающие нижние склоны всех сопок и слабо всхолмленные равнинные участки. Грунты здесь – устойчивые, покровы алювиально-делювиальных каменисто-щебенистых супесей и суглинков мощностью больше 5 м, песчано-галечные сухие грунты высоких дельтово-морских террас; мощные пирокластические отложения, состоящие из валунов и гальки с суглинистым и супесчаным заполнителем, сухих или с уровнем грунтовых вод ниже 5 м.

К X-балльной зоне отнесены участки наиболее слабых грунтов в районе города, состоящих из обводненных суглинков севернее сопки Петровской; насыпных или намывных грунтов с высоким уровнем грунтовых вод (выше 5 м); болотистых, заиленных грунтов в пойме ручьев.

В 1998 году специалисты Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН обратили внимание на наличие признаков оползневой опасности склонов на участке размещения очистных сооружений на мысе Чавыча. Выполненная изыскательской организацией проверка этого сообщения подтвердила данное предположение. По результатам обследования подтверждается наличие современных оползневых деформаций склона [37]. С этой целью необходимо выполнять специальные инженерно-геологические изыскания и наблюдение за опасными геологическими процессами [120].

Расположение установленных оползневых тел показано на рис. 3.16. Известен скальный оползень в южной части участка (рис. 3.16). Во многих местах береговых отрывов известны многочисленные зияющие трещины отседания, характерные для оползневых склонов. В толще рыхлых отложений отмечаются также признаки оползневых смещений и ползучести.

Впрочем, опасность схода скальных оползней высока только в южной прибрежной части территории. Это вызвано тем, что сложенные скальными породами слои имеют ориентированное к югу моноклинальное залегание (угол падения 25-40°). Кроме того, эти слои армированы дайками, что упрочняет массив. По этим причинам не рекомендуются к размещению объектов участки, примыкающие к береговым обрывам в южной и юго-восточной части территории.



Рис. 3.16. Расположение известных оползневых тел в южной части участка.
Темно-красными стрелками обозначены скальные оползни,
светло-красными – оползни в рыхлых отложениях.
Черными линиями показаны оползневые цирки, красные линии –
крупные зияющие трещины отрыва, голубые – дайки, армирующие склон

Опасность возникновения оползней в рыхлых отложениях может возникать в условиях повышенного увлажнения рыхлых пород. Однако, учитывая близкое залегание скального основания (при достаточной гидрогеологической изоляции грунтового основания по отношению к утечкам из иловых полей), оползневая опасность невысока.

Преимущественное развитие на территории имеют небольшие оползни, сходящие преимущественно в береговой зоне (рис. 3.17).

Во фронтальных частях готовящихся оползней интенсивно развиваются трещины отрыва (рис. 3.18), однако в тыловых частях даже небольших скальных оползней могут формироваться зоны дробления (рис. 3.19).

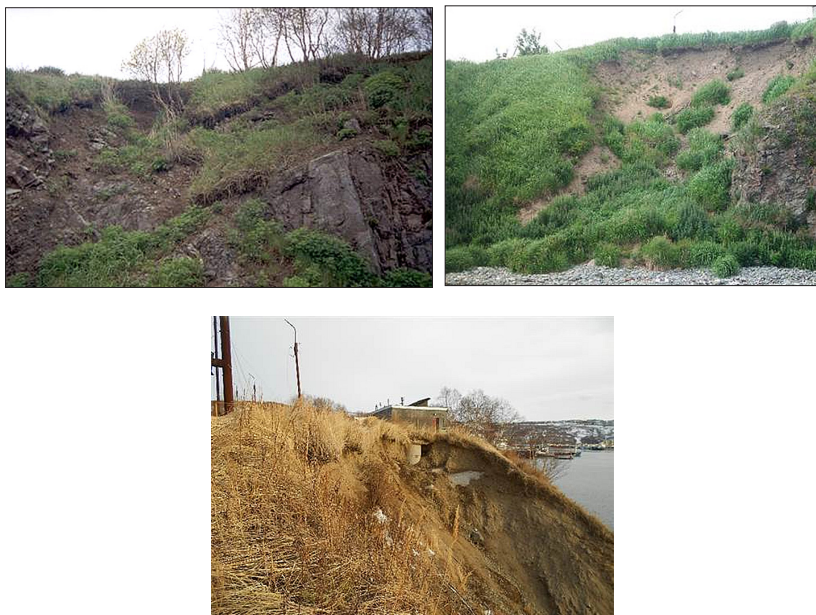


Рис. 3.17. Небольшие оползни в береговой зоне



Рис. 3.18. Раскрытия трещин во фронтальной части
небольшого скального оползня



Рис. 3.19. В тыловой части того же оползня сформировалась зона дробления с брекчией. В настоящее время у подножия абразионного уступа, врезанного в тело оползня, происходит раскрытие клиновидных трещин отседания (шириной до 20-25 см), чему способствуют также волноприбойные процессы

Схема георадарных профилей представлена на рисунке 3.20.



Рис. 3.20. Схема георадиолокационных профилей (мыс Чавыча, Камчатка)

На сейсмогеологическом разрезе №2 (приложение 4), соответствующий георадиолокационному профилю №2, можно выделить пять слоев. Первый слой соответствует насыпным грунтам – щебенистым с супесью дресвяной, коричневого цвета, пластичной с включением глыб до 5%. Залегает от поверхности до глубины 2.5 м и имеет скорости продольных волн в пределах от 304 до 397 м/с. Ниже до глубины 5 м залегает 2-ой слой, представленный щебенистым грунтом с супесчаным заполнителем твердой консистенции 30-35%, коричневого цвета, с включением глыб 10%. Скорости продольных волн 396 – 489 м/с, скорости поперечных волн 256 – 259 м/с. Этот слой также уверенно прослеживается на георадиолокационных профилях №2 и №3, на основе которых построена блок-схема георадиолокационных профилей (рис. 3.21). Привязка проводилась к скважине № 1. Хорошо видно, что слои совпадают по глубине. На блок-схеме были выделены цветовые слои в соответствии с описанием скважин и сейсмогеологических разрезов. Тело древнего оползня, выделенное на сейсмогеологическом профиле розовым цветом, также отмечается и на блок-схеме.

Протяженность георадиолокационного профиля №2 составила 16.7 м. Первый слой имеет значения $V_{\text{эМВ}} = 4$ см/нс и $E = 56.2$. Повышенные значения E обусловлены высокой степенью водонасыщенности отложений. Второй слой имеет значения $V_{\text{эМВ}} = 10.6$ см/нс и $E = 8.01$. Третий слой, отмеченный на сейсмогеологическом разрезе № 2 как оползневое тело, характеризуется значениями $V_{\text{эМВ}} = 4.71$ см/нс и $E = 40.57$. Для данного слоя характерно наклонное залегание осей синфазности. В четвертом слое оси синфазности позволили выделить границу лишь частично, при этом $V_{\text{эМВ}}$ варьирует от 7.24 до 8.96 см/нс, что связано с незначительным изменением степени водонасыщения. Диэлектрическая проницаемость изменяется от 11.22 до 17.14. Протяженность георадиолокационного профиля № 3 составила 105.4 м. Привязка профиля проводилась к скважине №2. На профиле выделяются три слоя. Первый слой – насыпной щебенистый грунт с супесью до 40%, $V_{\text{эМВ}} = 7.27$ см/нс; $E = 17.06$. Второй слой представлен супесью дресвяной с включением глыб до 5%, $V_{\text{эМВ}} = 10.6$ см/нс и $E = 8.01$.

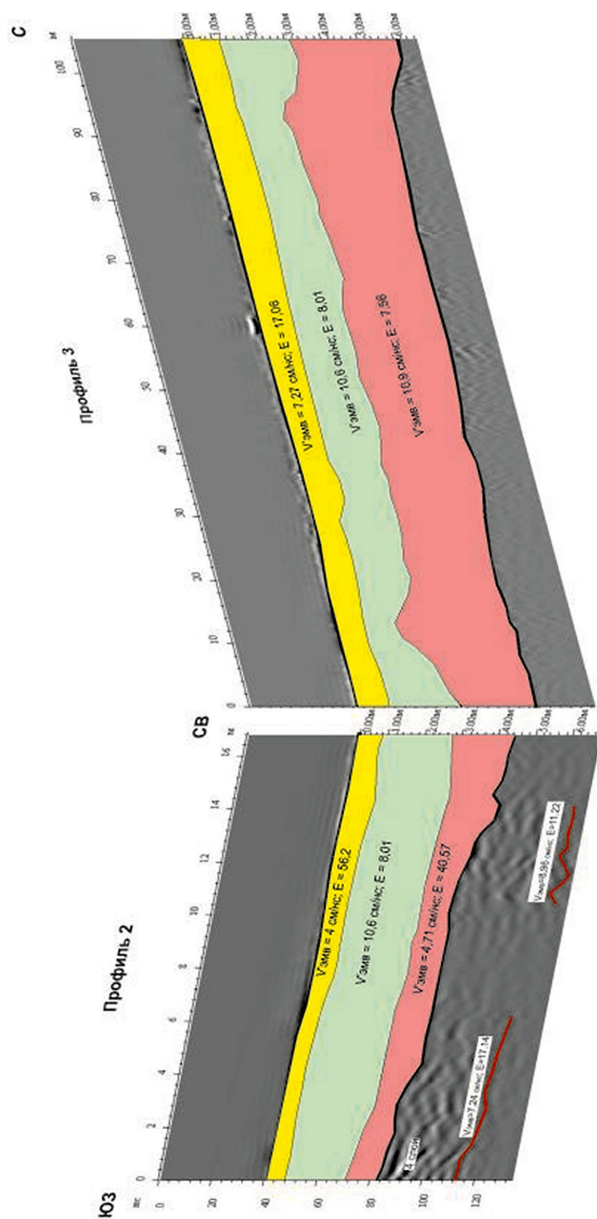


Рис. 3.21. Блок-схема георадиолокационных профилей: V – скорость электромагнитной волны в м/нс, E – диэлектрическая проницаемость, рассчитанная для осей синфазности

Обращает на себя внимание тот факт, что на профиле №2 для второго слоя характерны такие же значения $V_{\text{эмв}}$ и E . Третий слой – щебенистый грунт с песчаным заполнителем влажным 30-35% с включением глыб до 10%, $V_{\text{эмв}} = 10.9$ см/нс; $E = 7.56$.

На георадиолокационном профиле №1 (рис. 3.22, 3.23) можно выделить 4 участка, на которых наблюдается смена георадарных фаций.

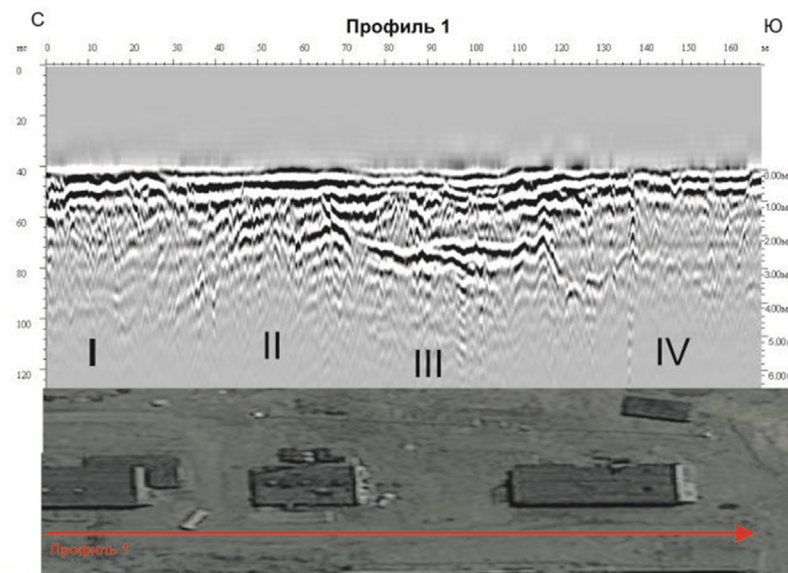


Рис. 3.22. Георадарные фации по профилю № 1

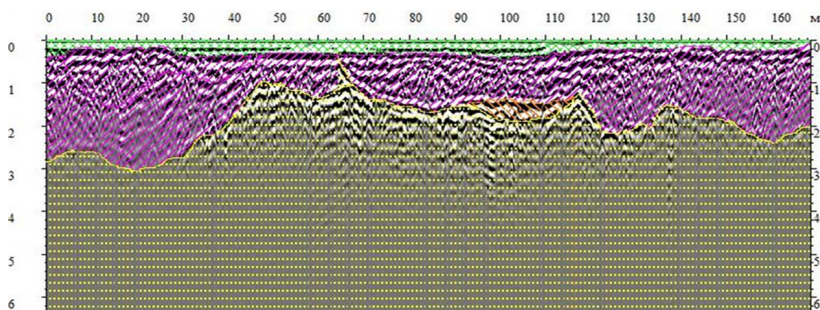


Рис. 3.23. Георадиолокационный профиль № 1

Расчленение идет в вертикальном направлении, связанное с особенностями волновой картины: I фация – наклонное и хаотическое расположение осей синфазности; II – субгоризонтальное хаотическое расположение осей синфазности; III – субгоризонтальное и хаотическое расположение пересекающихся осей синфазности; IV – хаотическое расположение осей синфазности, наличие дифракций.

Рисунок 3.24 демонстрирует, как эти георадарные фации различаются по $V_{\text{ЭМВ}}$ и E . Первый слой – насыпной щебенистый грунт. $V_{\text{ЭМВ}} = 11.2$ см/нс; $E=7.29$. Мощность слоя 1.30 м. Второй слой – дресвянный грунт с песчаным заполнителем и разной степенью водонасыщения. $V_{\text{ЭМВ}}$ варьирует от 5.33 до 14 см/нс, что связано с изменением степени водонасыщения. Незначительные изменения содержания воды в грунтах приводят к большим изменениям диэлектрической проницаемости от 4.41 до 31.4. На расстоянии 139 м расположена коммуникация, что отмечается на радарограмме наличием дифрагированных волн. Третий слой характеризуется $V_{\text{ЭМВ}} = 10.71$ см/нс и $E = 7.84$. Мощность слоя варьирует от 1 до 3 м. В описании скважины № 212 эти грунты обозначены как – элювий выветрелых диабазов, разрушенный до щебенистого грунта.

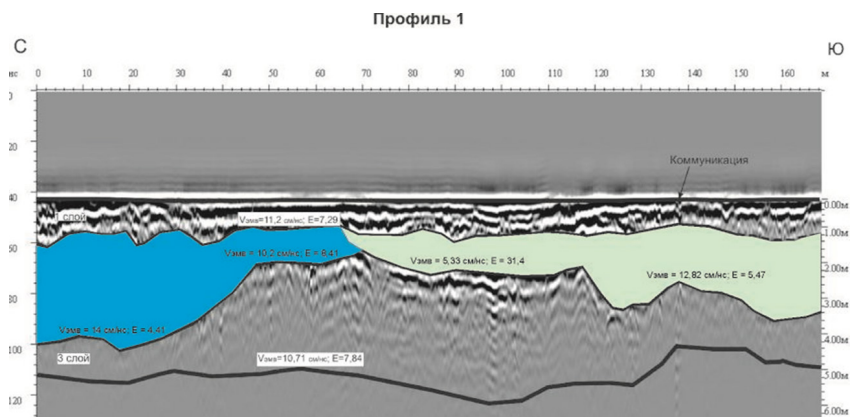


Рис. 3.24. Георадиолокационный профиль № 1
Слева выделен склон палеоручья, справа – тело древнего оползня, сложенного дресвяными грунтами

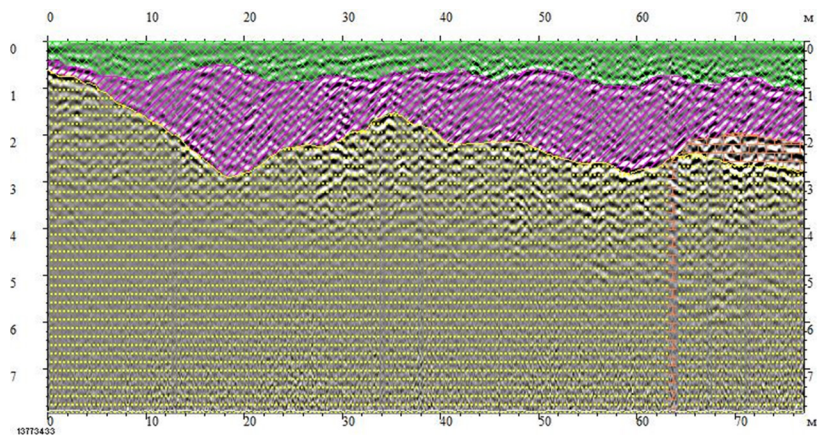
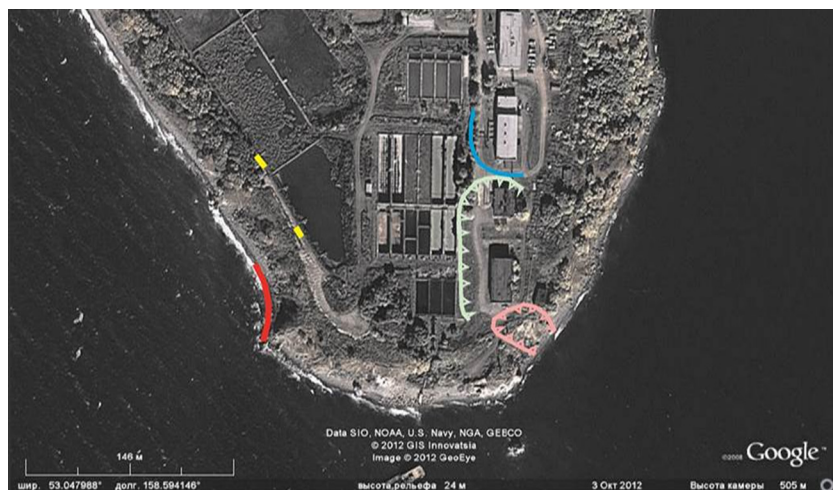


Рис. 3.25. Радарограмма по профилю 14

На некоторых профилях, которые располагали по насыпи вдоль иловых полей, небольшая глубина прослеживания полезного сигнала (рис. 3.25). Это связано с утечками из иловых полей, что подтверждается данными бурения.

В результате работ и последующего анализа собранного материала, на участке исследования были выявлены утечки с иловых полей, одна из которых приводит к разгрузке грунтовых вод в виде высачивания из трещины в береговом уступе. А также тело древнего оползня, представленное щебенистым грунтом, тело древнего оползня, представленное дресвяным грунтом и склон палеоручья (рис. 3.26).

Анализ сейсмических условий и оползневой опасности площадки очистных сооружений показал, что оползневая опасность на данной территории достаточно высока. Установлено расположение двух оползневых тел, а также склон палеоручья. По результатам работ устанавливается наличие оползневых процессов в восточном сегменте южной части площадки. Уточнение сейсмических условий территории позволило сделать вывод о том, что сейсмичность данной площадки равна 10 баллам в западной части и 9 баллам в юго-восточной части склона.



| <u>Условные обозначения:</u> | |
|------------------------------|---|
| | - питающие трещины, по которым происходит водное питание родника; |
| | - утечки с иловых полей; |
| | - склон палеоручья; |
| | - тело древнего оползня, представленное щебенистым грунтом; |
| | - тело древнего оползня, представленное дресвяным грунтом. |

Рис. 3.26. Карта-схема локализации опасных процессов на площадке очистных сооружений на мысе Чавыча

При строительстве на территориях с насыпными грунтами необходимо выполнять их удаление, включая макропористые грунты, иначе возможно сползание не только грунтов, но и построек вниз по склону. Судя по сейсмогеологическим разрезам, отсыпка насыпных грунтов осуществлялась непосредственно на рельеф, при этом не убирался склонный к разжижению при увлажнении почвенно-

пирокластический чехол («подпочвенные» макропористые супеси пластичной и текучей консистенции). Это может ускорить развитие оползневых процессов в рыхлых грунтах при переувлажнении, особенно на участке западного борта иловых полей, где происходит утечка воды.

Все полученные результаты использованы для реконструкции и строительства зданий на данной территории.

§3.4. Уточнение инженерно-геологических условий для реконструкции здания на побережье Авачинской губы

В региональном плане побережье Авачинской губы – это сочетание двух морфоструктур: линейно вытянутой в северо-западном направлении морфоструктуры Петропавловского горста и изометрической депрессионной морфоструктуры Авачинской губы. Вышеназванные морфоструктуры разделены грабеном Береговым, который протягивается вдоль Авачинской губы на 1 км и с северной стороны ограничен массивом сопки Мишенной. Северная половина грабена занята мелководным Култушным озером лиманного типа. В строении территории выделяются два структурных этажа – верхний и нижний. В строении нижнего структурного этажа преобладают осадочные и эффузивно-пирокластические породы, метаморфизованные в зеленокаменные сланцы. Породы нижнего структурного этажа обнажаются на склонах сопки Никольской и Петровской, представляющих собой два разновысотных приподнятых тектонических блока, входящих в систему Петропавловского горста. Предполагается, что подобное строение имеет и погребенная часть нижнего этажа в основании днища Берегового грабена [75, 76].

Вдоль побережья Авачинской губы расположено множество строений и зданий города Петропавловска-Камчатского. Задача заключается в уточнении литологического строения рыхлых отложений для реконструкции территории здания КГБУ «Камчатский краевой объединенный музей», улица Ленинская, 20 (рис. 3.20).

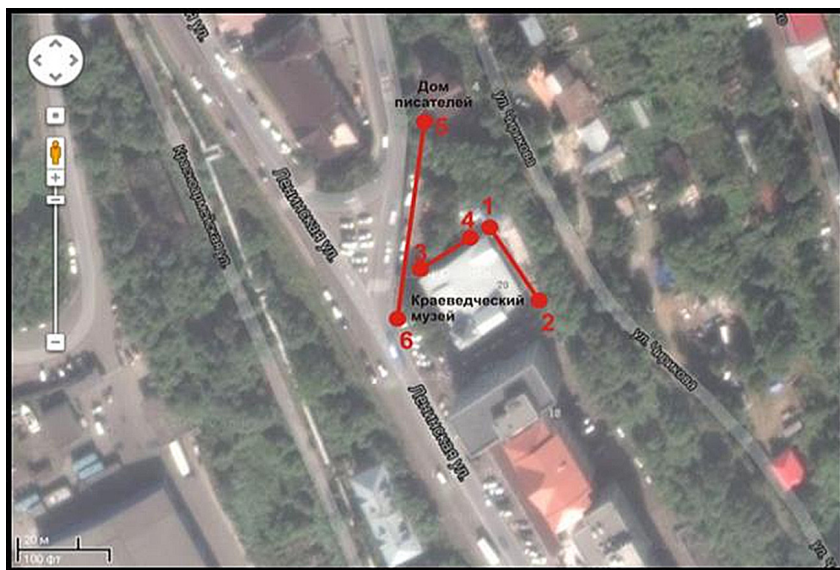


Рис. 3.27. Схема расположения георадиолокационных профилей на территории КГБУ «Камчатский краевой объединенный музей», улица Ленинская, 20: 1-2 – профиль 1 (36 м); 3-4 – профиль 2 (29 м); 5-6 – профиль 3 (57 м).
Космический снимок Image Landsat, Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO www.eart.google)

На радарограммах, полученных при георадарном профилировании на трёх профилях общей протяженностью 122 м (рис. 3.28) хорошо проявляется слоистая толща рыхлых отложений до глубин 2-3 м. По полученным данным на двух профилях 1 и 2 рыхлые отложения не нарушены, слои залегают горизонтально. Предположительно эти отложения представлены насыпными грунтами, которые были отсыпаны здесь при планировке территории. Ниже по склону (к западу от здания музея) в рельефе хорошо проявлена неглубокая (2-3 м) и не широкая (около 20 м) ложбина (рис. 3.28, профиль 3), она же видна над уступом, врезанном в склон при планировке территории. Само же здание располагается на выровненной территории, сформированной за счет планировки и отсыпки этой ложбины. Севернее и южнее участка располагаются другие

ложбины, подобные описанной на территории музея. Северную ложбину пересекает георадарный профиль 3, и на нем видно, что мощность отложений, выполняющих её, невелика (5-6 м). Ложбины имеют, скорее всего, не аллювиальное, а пролювиальное происхождение, т.е. осадконакопление происходило при весеннем снеготаянии и осенних ливнях.

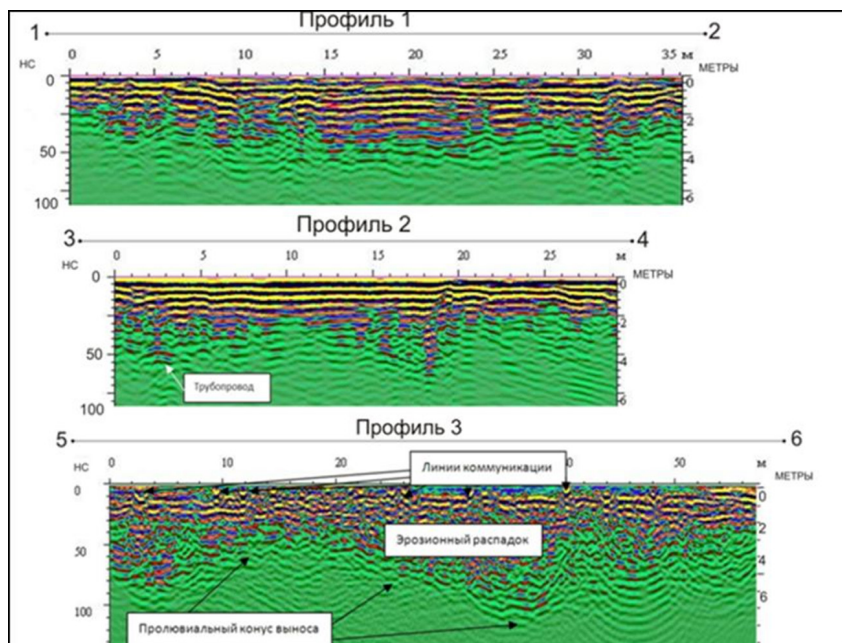


Рис. 3.28. Радарограммы по профилям на территории КГБУ «Камчатский краевой объединенный музей», улица Ленинская, 20

На карте сейсмического микрорайонирования исследуемая площадка находится в подзоне IX Б. В эту подзону вошли участки, сложенные супесчаными и щебенистыми грунтами, плотными и средней плотности, при уровне грунтовых вод ниже 3 м от поверхности. В этой же подзоне делювиальные, аллювиально-морские и элювиально-делювиальные отложения средней плотности,

представленные крупнообломочными отложениями (при уровне грунтовых вод ниже 2 м) [55; с. 61-70, 59; с. 232-236, 74].

При соблюдении рекомендаций о соблюдении условий дренажа вышележащих склонов и сохранении нижележащих склонов (не подрезать их) общая устойчивость данного склона и устойчивость основания здания музея обеспечена [38]. Таким образом, толща рыхлых отложений представляет собой верхний структурный этаж, состоящий из рыхлых слоистых отложений различного генезиса: насыпных, морских, лагунных и др., мощностью до первых десятков метров.

§3.5. Уточнение грунтовых условий на Озерновской косе Култучного озера (город Петропавловск-Камчатский)

Исследуемый участок находится в центральной исторической части города Петропавловска-Камчатского и расположен на юго-западной берегу Култучного озера. В геоморфологическом отношении площадка расположена на восточной границе морской косы, отделяющей акваторию Авачинской губы от озера Култучного, и засыпанной части акватории озера.

На карте сейсмического микрорайонирования г. Петропавловска-Камчатского 1974 г. изученная площадка расположена в зоне с сейсмической опасностью X баллов. К X-балльной зоне отнесены участки наиболее слабых грунтов в районе города, состоящих из обводненных суглинков севернее сопки Петровской; насыпных или намывных грунтов с высоким уровнем грунтовых вод (выше 5 м); болотистых, заиленных грунтов в пойме ручьев. Практическая значимость работы заключается в том, что полученные данные помогут уточнить грунтовые условия на важном участке для города Петропавловск-Камчатский. Здесь проходит главная транспортная магистраль, по которой ходят маршрутные автобусы и располагаются административные здания. Территория подвержена антропогенному воздействию. Уточнение грунтовых условий важно при планировании использования данной территории для социальных нужд.

Рельеф площадки ровный искусственно сформирован при строительном освоении территории (рис. 3.29). Засыпка Култучного озера началась в 1920-х годах с южных берегов. Со стороны улицы Максutowa засыпка озера достигла промышленных масштабов. В начале 1950-х годов был снесен мост, связывающий улицу Набережную с улицей Ленинградской, ручей был спрятан в трубу, засыпка озера продолжилась. В результате, Култучное озеро почти в два раза сократилось по сравнению с первоначальной площадью. Еще в 30-е годы XX века длина озера оставляла около 2 километров, а ширина более 300 метров. На данный момент длина Култучного озера составляет 815 метров, ширина – 283 метра, глубина – 6–7 метров, толщина ила – 3 метра. В воде присутствует много органики и продуктов ее распада [<http://www.piragis.ru/history/kultuchnoe-ozero.html>].

В региональном плане Озерновская коса Култучного озера располагается в зоне сочленения двух морфоструктур: линейно вытянутой в северо-западном направлении морфоструктуры Петропавловского горста и изометрической депрессионной морфоструктуры Авачинской губы. Вышеназванные морфоструктуры разделены грабеном Береговым, который протягивается вдоль Авачинской губы на 1 км и с северной стороны ограничен массивом сопки Мишенной. Северная половина грабена занята мелководным Култучным озером лиманного типа. Вертикальные движения вдоль грабенообразующих разломов в историческое время не фиксировались [75, 76].

В геологическом строении территории выделяются два структурных этажа – верхний и нижний. В строении нижнего структурного этажа преобладают осадочные и эффузивно-пирокластические породы, метаморфизованные в зеленокаменные сланцы (рис. 3.29). Породы нижнего структурного этажа имеют моноклиальное залегание с углами падения от 1450 до 2300, обнажаются на склонах сопки Никольской и Петровской, представляющих собой два разновысотных приподнятых тектонических блока, входящих в систему Петропавловского горста. Предполагается, что подобное строение имеет и погребенная часть нижнего этажа в основании днища Берегового грабена.



Рис. 3.29. Район проведения работ: 1 – строительное освоение территории; 2 – насыпные грунты; 3 и 4 – эффузивно-пирокластические породы, метаморфизованные в зеленокаменные сланцы

По совокупности литологических признаков и физико-механических свойств грунтов в разрезе участка работ и прилегающей территории выделяются инженерно-геологические элементы (ИГЭ), представленные в разрезах скважины №1 (дата проходки: 11.01.07 г. и 13.04.87 г.). Анализируя скважину №1 в разные даты проходки, можно отметить следующее. В разрезе скважины 13.04.87 г. есть почвенно-растительный слой мощность 0.2 м, который на скважине 11.01.07 г. отсутствует. Это связано с тем, что начали производиться работы по благоустройству Озерновской косы. В скважине 11.01.07 г., на глубине 2.1-2.6 м, кроме насыпного грунта, супеси (темно-серая пластичная, коричневатая – серая пластичная с галькой и щеб-

нем) присутствует супесь заторфованная (водонасыщенные грунты (торф) с большим содержанием органических веществ). Таким образом, из разрезов имеющейся скважины на Озерновской косе видим со временем увеличение мощности насыпного щебенистого грунта от 2.4 до 3.1 м, отмечается водонасыщенность грунтов.

Георадарное профилирование включает 9 профилей (четыре параллельных: 1-2, 2-3, 4-5, 5-6; пять в крест: 7-8, 9-10, 11-12, 13-14, 15-16) (рис. 3.30). Глубина зондирования составила от 6 до 10 м.

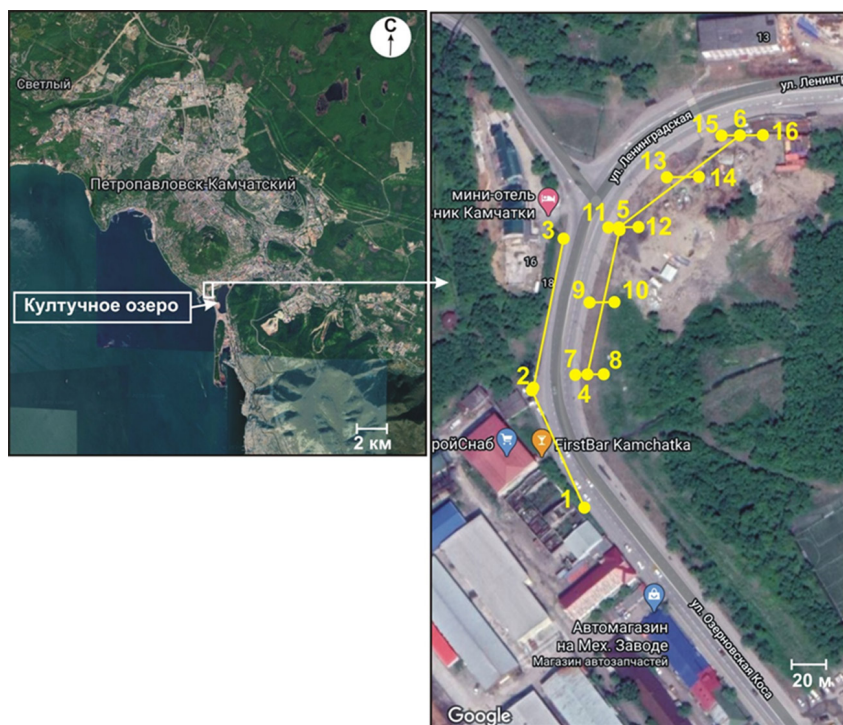


Рис. 3.30. Схема расположения георадиолокационных профилей: цифры от 1 до 16 – георадарные профили (обозначение начала и конца)

По конфигурации и корреляции осей синфазности на всех радарограммах можно уверенно выделить три слоя (рис. 3.31, 3.32, 3.33).

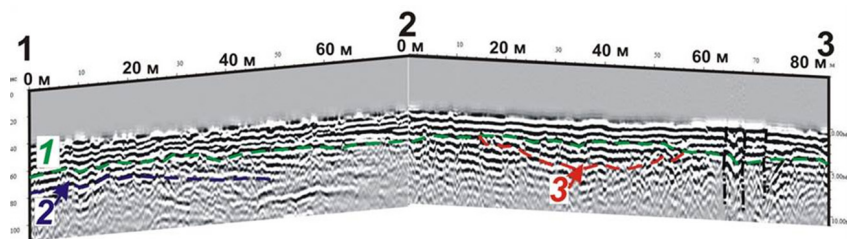


Рис. 3.31. Радарограммы по георадиолокационным профилям: большие цифры от 1 до 3 – георадарные профили (обозначение начала и конца); 1, 2, 3 – номера слоев; горизонтальная шкала – расстояния в метрах; вертикальная шкала справа – глубина в метрах; вертикальная шкала слева – двойное время прихода отраженной электромагнитной волны

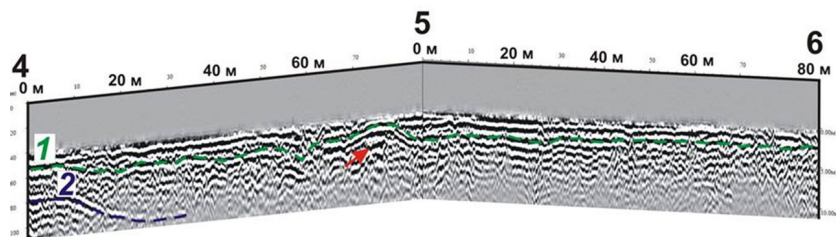


Рис. 3.32. Радарограммы по георадиолокационным профилям: большие цифры от 4 до 6 – георадарные профили (обозначение начала и конца); 1, 2 – номера слоев; красная стрелка – указывает на поднятие слоя грунта; горизонтальная шкала – расстояния в метрах; вертикальная шкала справа – глубина в метрах; вертикальная шкала слева – двойное время прихода отраженной электромагнитной волны

Все слои – это насыпной грунт, супесь (с галькой и щебнем), заторфованная. Слой №1 наиболее мощный (до 4 м) наблюдается на профиле 1-2-3, 7-8, 11-12, 15-16. Слой №2 мощностью до 2 м залегает под наклоном в сторону Култучного озера. Слой №3 наблюдается не на всех профилях и залегает в виде линзы. На радарограмме по профилю 1-2-3 хорошо выделяются эффузивно-пирокластические породы, метаморфизованные в зеленокаменные сланцы, представленные проходящей волной (на рисунке 3.31 вертикальные жирные пунктирные линии) и уходящие на глубину в насыпной грунт. На профиле 4-5-6 отмечается поднятие слоя грунта (рис. 3.32).

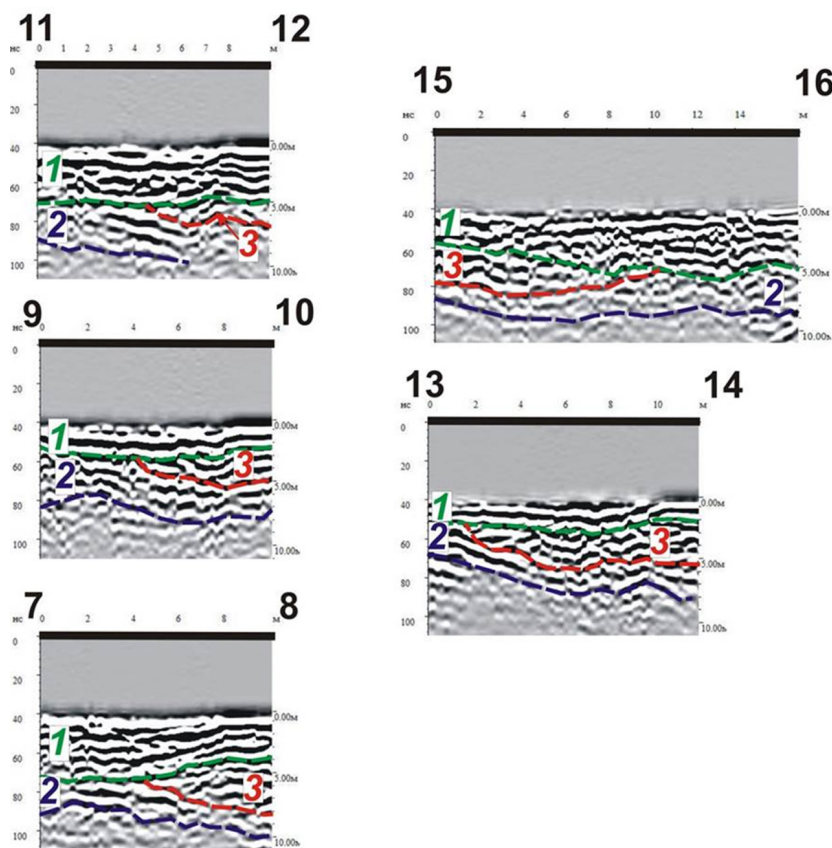


Рис. 3.33. Радарограммы по георадиолокационным профилям: большие цифры от 7 до 16 – георадарные профили (обозначение начала и конца); 1, 2, 3 – номера слоев; горизонтальная шкала – расстояния в метрах; вертикальная шкала справа – глубина в метрах; вертикальная шкала слева – двойное время прихода отраженной электромагнитной волны

Характерен контраст в значениях V (см/нс) и E (таблица 1). Слой №1 – это плотный монолитный грунт. С глубиной влагонасыщенность увеличивается. Наиболее влагонасыщенным и проницаемым является заторфованный слой №2. Для слоя №3 также характерна высокая влагонасыщенность грунтов.

Таблица 3.1

**Изменение скорости распространения электромагнитных волн
(V , см/нс) и диэлектрической проницаемости E
для грунтов в районе проведения работ**

| Тип грунта | № слоя | V (см/нс) | E | № профиля |
|--|--------|-------------|---------------|-----------|
| Насыпной грунт, супесь (с галькой и щебнем), зоторфованная | 1 | 6.15 | 23.79 | 1-2-3 |
| | | 8 | 14.06 | 4-5-6 |
| | | 8.5 | 12.45 | 7-8 |
| | | 7.6 | 15.58 | 9-10 |
| | | 14 | 4.59 | 11-12 |
| | | 7.6 | 15.58 | 13-14 |
| | | 17.2 | 3 | 15-16 |
| | 2 | 10 | 9 | 1-2-3 |
| | | 12 | 6.25 | 4-5-6 |
| | | 4 – 4.4 | 46.6 – 56.25 | 7-8 |
| | | 10 – 12.5 | 5.76 – 9 | 9-10 |
| | | 8 – 9.09 | 10.8 – 14.06 | 11-12 |
| | | 6.81 – 8.95 | 11.23 – 19.4 | 13-14 |
| | | 9.41 – 12.3 | 5.94 – 10.16 | 15-16 |
| | 3 | 7 – 8 | 14.06 – 18.36 | 1-2-3 |
| | | - | - | 4-5-6 |
| | | 8.88 – 10.6 | 8 – 11.41 | 7-8 |
| | | 9.2 – 10.3 | 8.4 – 10.6 | 9-10 |
| | | 5 – 6.89 | 18.95 – 36 | 11-12 |
| | | 11.7 – 16 | 3.51 – 6.57 | 13-14 |
| | | 7.5 – 8.5 | 12.45 – 16 | 15-16 |

С увеличением влажности грунтов увеличиваются значения диэлектрической проницаемости и, соответственно, уменьшаются скорости распространения электромагнитной волны. Эти показатели помогают в уточнении грунтовых условий. На исследуемом участке Озерновской косы Кулгучного озера (город Петропавловск-

Камчатский) отмечается наиболее плотный грунт до глубины от 2 до 4 м. С глубиной увеличивается влагонасыщенность грунтов, что необходимо учитывать при планировании строительства на данной территории.

Таким образом, сканирование георадаром «ОКО-250» позволяет оценить различные аспекты пригодности грунтового основания для застройки. Важно отметить значимость георадара для выявления содержания влаги и эрозии грунтов.

Благодаря полученным данным, появляется возможность принимать правильные решения при проектировании объектов строительства.

§3.6. Строение приповерхностной толщи отложений в кальдере вулкана Горелый

Вулкан Горелый – один из действующих вулканов Камчатки, ближайший к г. Петропавловск-Камчатский. Он находится в относительно доступной местности в 70 км от города и в 25 км от берега Тихого океана.

Постройка вулкана Горелый представлена линейным вулканическим хребтом длиной 3 км [72; с. 17-31], по другим данным 7 км [71; с. 3-18], вытянутым в субширотном, западно-северо-западном направлении. Она состоит из трех главных, длительно действовавших конусов (Горелый-1-3) и более чем трех десятков конусов одноактных побочных прорывов [91; с. 3-23]. Сам вулкан сложен преимущественно базальтовыми и андезитобазальтовыми породами [48; с. 25-43, 49; с. 32, 71; с. 3-18]. Максимальная абсолютная высота вулкана 1829 м, подножие находится на отметках 900–1100 м. Все сооружение располагается в обширной кальдере, имеющей овальную, удлинённую к северо-западу форму и размеры по осям 9х13 км [91; с. 3-23], площадью около 100 км² [71; с. 3-18]. Образование кальдеры датировано тефростратиграфическим методом (~38-40 тыс. лет назад) по соотношениям «гореловских» игнимбритов с аналогичными и субодновременными отложениями кальдеры вулкана Опала на западе [71; с. 17-31].

Метод георадиолокации позволяет получить представление о строении приповерхностной толщи отложений до глубины 6 м. Для исследования был выбран кальдерный уступ в северо-восточном секторе кальдеры. Здесь проходит маршрут для передвижения туристов, автомобильного транспорта. Уступ находится на расстоянии 653 м от начала профиля (пикет 653 м), и 298 м от конца профиля, т.е. соотношение длины профиля по днищу кальдеры к длине его на поверхности вулканического плато составляет примерно 2/1 (рис. 3.34). В результате проведения работ получен георадиолокационный разрез до глубины 6 м (рис. 3.35, 3.36).

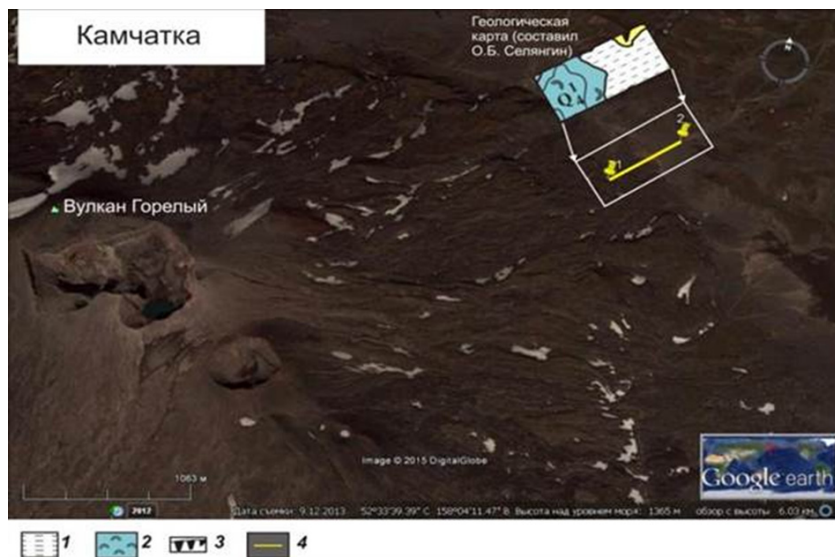


Рис. 3.34. Схема расположения георадиолокационного профиля: на геологической карте [91; с. 3-23]: 1 – комплекс водно-ледниковых, аллювиально-пролювиальных и озерных отложений с прослоями вулканических пеплов и шлаков (Q_3^4 – Q_4^4); 2 – лавовые потоки андезитобазальтов, базальтов; 3 – гребни и бровки кальдерных уступов. 4 – георадиолокационный профиль

По данным предшествующих работ И.Т. Кирсанова [48; с. 25-43, 49; с. 32], И.В. Мелекесцева [71; с. 3-18, 72; с. 17-31, 73; 201 с.] и описанию шурфов разрез представлен чередованием вулканических

песков черного, темно-серого, желтого цвета с примесью гравия пемзы. Встречаются региональные маркирующие прослои пеплов, выделенные другими авторами в голоценовом почвенно-пирокластическом чехле района вулкана Горелый: вулканический песок цвета «соль с перцем» с примесью гравия пемзы (вулкан-источник Ксудач); белый или желтый вулканический песок с гравием и лапиллии пемзы (вулкан-источник Опала) [91; с. 3-23, табл. 1]. Встречаются горизонты шлаков, представленные гравием. По мере приближения к вулкану мощность слоев растет от 1 до 40 см, появляются бомбы до 10 см в поперечнике. На радарограмме отложения лавовых потоков андезитобазальтов, базальтов и их элювия выделяются в виде хаотического расположения осей синфазности, затуханием электромагнитных волн, выделением линз. Отложения аккумулятивных равнин, где встречаются вулканические пески, на радарограмме представлены в виде горизонтального расположения осей синфазности, последовательно залегающих друг на друга. Характерно некоторое наклонное залегание осей синфазности, их падение к северо-восточному направлению.

На радарограммах хорошо проявлены обводнённые или сильно увлажнённые части разреза (зелёные тона на глубинах от 1 до 6 м, рис. 3.35, 3.36) и маловлажные части разреза с хорошо выраженной стратификацией слоёв (красные тона на глубинах от 1 до 6 м, рис. 3.35, 3.36). На глубине 6 м практически всё днище кальдеры сложено водонасыщенными отложениями. Начиная с глубины 5 м и выше степень увлажнённости отложений меняется, от сильно увлажненных осадков до сухих. В вертикальном сечении форма зон увлажнения куполовидная, с суживающимися в направлении земной поверхности вершинами. На участках расположения сухих грунтов видно, что они представляют собой чашеобразные мульды. Визуальное изучение разрезов в шурфах позволяет сделать вывод, что мульдообразные понижения сложены песками. На этих участках в периоды снеготаяния формируются озера, в которых происходит вымывание тонких пелитовых и глинистых фракций (продуктов разрушения пемз и пепла) в песок. Увеличение их содержания в песке приводит к формированию локального водоупора, служащего дном озера.



Рис. 3.35. Результаты работ: 1 – расстояние по профилю в метрах; 2 – глубина в метрах; 1 – лавы и шлаки андезитобазальтов, базальтов; П – аккумулятивные равнины разного генезиса с прослоями вулканических пещлов. Фотографии (В.Ю. Павлова): 1 – вид на вулкан Горелый; 2 – лавы и шлаки андезитобазальтов, базальтов; 3 – образец горной породы; 4, 5 – аккумулятивные равнины; 6, 7, 8 – шурфы (до 2 м), представленные горизонтами вулканических песков

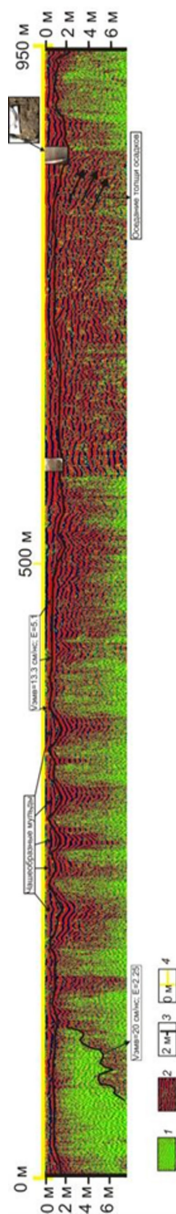


Рис. 3.36. Георадиолокационный профиль: 1 — обводненные или сильно увлажненные части разреза; 2 — маловлажные части разреза; 3 — глубина в метрах; 4 — расстояние по профилю в метрах; $V_{ЭМВ}$ — скорость электромагнитной волны (см/нс); Е — диэлектрическая проницаемость; на фото (В.Ю. Павлова) — горизонты вулканических песков

Границы слоев согласны друг другу, но при этом выделяется несколько угловых несогласий. Можно предполагать, что, по крайней мере, при формировании горизонта с подошвой на глубине 3 м, произошел перерыв в осадконакоплении, либо же сильно изменилась морфология областей транзита и накопления осадков. Водонасыщение характерно лишь для отложений, расположенных в верховьях ручьев, дренирующих плато (конец профиля, пикеты 850-950 м).

§3.7. Некоторые методы дополнительной обработки данных георадиолокации на примере радарограмм, полученных в кратере вулкана Горелый¹¹

Одна из задач исследований: применение некоторых методов дополнительной обработки результатов зондирования на конкретных объектах исследования для изучения особенностей волновой картины на радарограммах.

Состояние изученности:

1. В мировой практике это первый опыт проведения исследования методом георадиолокации в кратере активного вулкана.
2. Впервые на Камчатке проведены исследования методом георадиолокации в кратере вулкана Горелый.
3. Некоторые методы дополнительной обработки данных георадиолокации, представленные в работе, впервые применены для радарограмм, полученных в кратере активного вулкана.

Стратовулкан Горелый относят к щитообразным, т.е. переходным по типу к пологим щитовым, существенно лавовым сооружениям. На вершине обнажаются современные и нерасчлененные голоценовые отложения: резургентные пеплы и глыбы последних извержений вулкана Горелый, андезито-базальты и андезиты. Поверх слоев, облекающих днища и основания стенок этих

¹¹ Павлова В.Ю., Водинчар Г.М., Некрасова М.Ю. Некоторые методы дополнительной обработки данных георадиолокации на примере радарограмм, полученных в кратере вулкана Горелый (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2023. Т. 44, № 3. С. 173-194. DOI: 10.26117/2079-6641-2023-44-3-173-194. URL: <https://krassec.ru/ru/pavlova2023443/>

кратеров, залегают горизонтально-слоистые пачки обломочного материала и лав. Характерны слоистые отложения разной мощности (рис. 3.37, 3.38, 3.39).

При проведении исследований в кратере вулкана Горелый, с учетом сложного рельефа, большой высоты, было выбрано два профиля на наиболее удобных площадках для проведения работ: профиль 1 – на юго-западной стороне напротив северо-восточной стенки активного кратера постройки Горелый-2, профиль 2 – на северо-восточной стороне неактивного (восточного) кратера постройки Горелый-3. (рис. 3.40).

Анализируя волновую картину радарограммы, полученной в активном кратере, можно выделить горизонтальные протяженные оси синфазности, далее происходит затухание электромагнитных волн с глубины 2 м. (рис. 3.41).

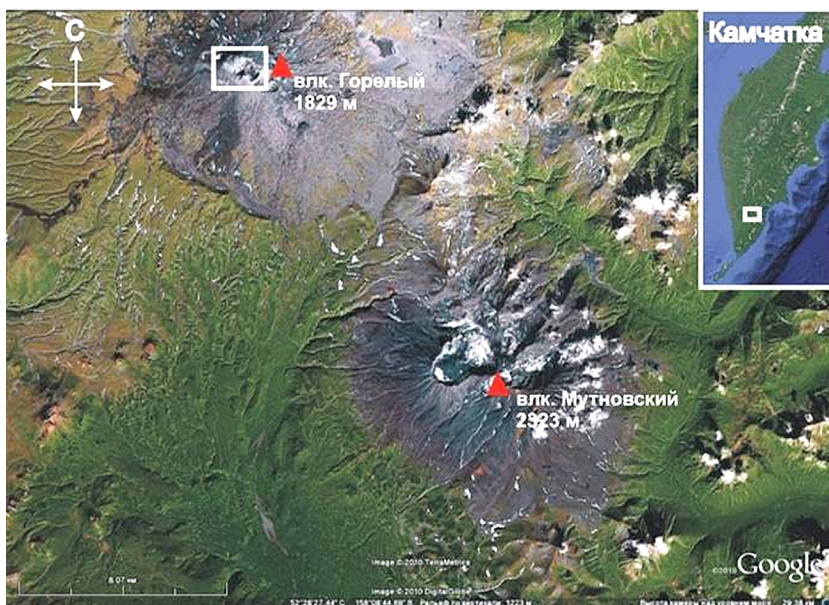


Рис. 3.37. Карта района исследований. Участок проведения работ отмечен прямоугольником (кратер вулкана Горелый)



Рис. 3.38. Кратер вулкана Горелый



Рис. 3.39. Кратер вулкана Горелый.
Красным овалом выделены люди (для масштаба)

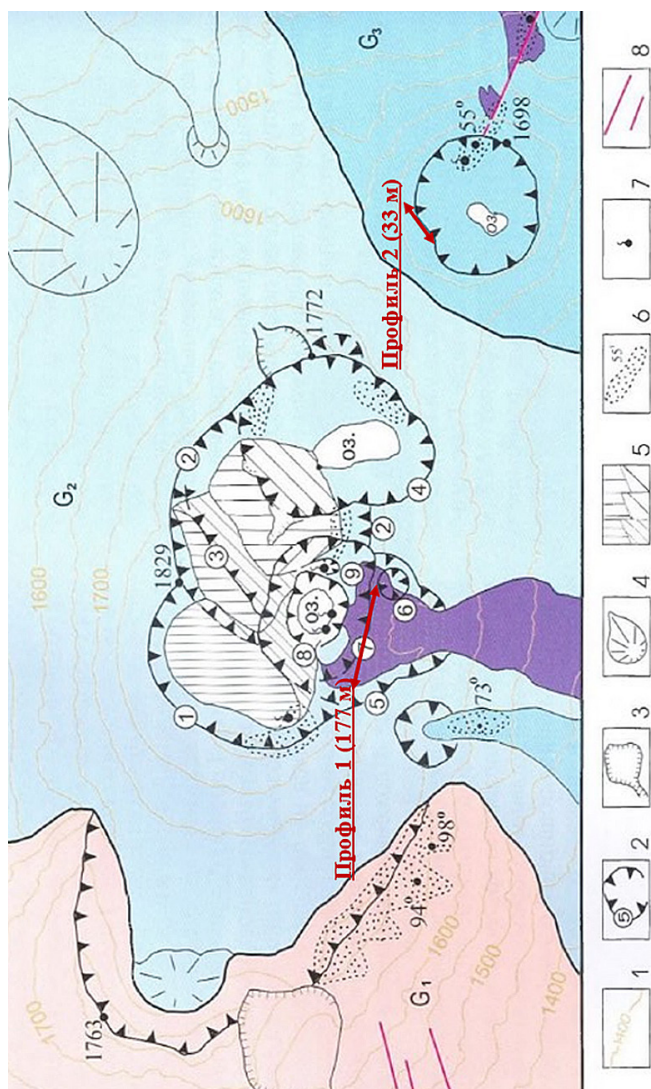


Рис. 3.40. Геолого-морфологическая схема вершинной зоны в. Горелый [92] с отмеченными георадиолокационными профилями 1 и 2: 1 – изолинии рельефа; 2 – кратеры в. Горелый-2 и их номера от ранних к поздним; 3 – бровки эрозионных рытин и барранкосов; 4 – шлаковые конусы побочных прорывов; 5 – комплексы заполнения кратеров Горелого-2; 6, 7 – термальные площадки и значения температур их разогрева в 1980 г.; 8 – трещины. Цветом и индексами G показаны комплексы вулканитов основных конусов, составляющих постройку в. Горелый (Горелый 1 – 3) и молодых излияний

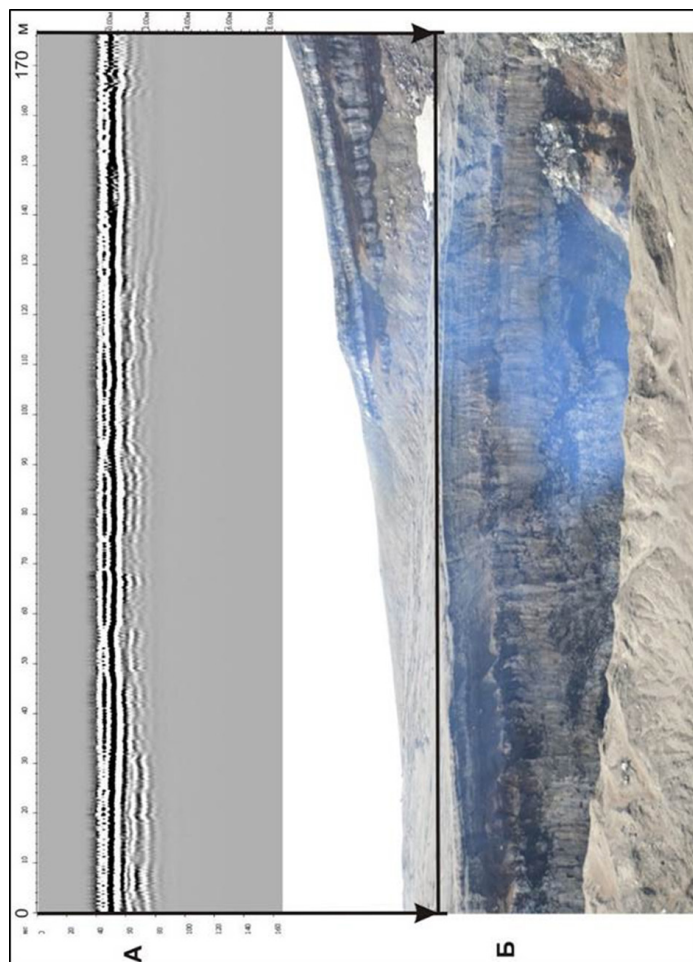


Рис. 3.41. Радарограмма по профилю 1:

А – радарограмма, вертикальная шкала слева – время электромагнитной волны, нс, вертикальная шкала справа – глубина, м, горизонтальная шкала – расстояние, м;

Б – юго-западная стенка активного кратера (постройка вулкана Горелый-2), где черной линией отмечены границы профиля 1

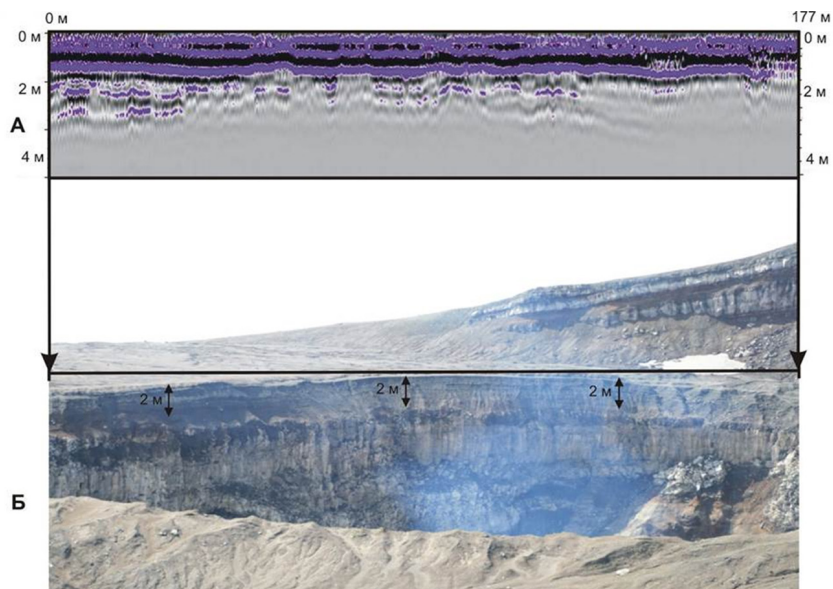


Рис. 3.42. Интерпретация радарограммы по профилю 1: А – радарограмма, вертикальная шкала – глубина, м, горизонтальная шкала – расстояние, м; Б – юго-западная стенка активного кратера (постройка вулкана Горелый-2), где черной линией отмечены границы профиля 1. Выделенные отложения соответствуют горизонтам вулканических пеплов и андезито-базальтам

Цветовой контраст приведен в соответствии с геологической картой. (рис. 3.42). До глубины 2 м четко выделяются горизонты вулканических пеплов в переслаивании с андезито-базальтовыми потоками. Мутьдообразные понижения, угловые несогласия верхней части отложений у стенки кратера отсутствуют.

Анализируя волновую картину радарограммы, полученной в неактивном кратере, можно выделить с некоторым углом наклона горизонтальные протяженные оси синфазности, которые четко выделяются до глубины 4 м, далее происходит их затухание (рис. 3.43). Это соответствует залеганию лав и пирокластики андезито-базальтового состава умеренно эродированных со временем, характерных для данного кратера. Отсюда некоторые углы наклона в их залегании и смещение слоев. (рис. 3.44).

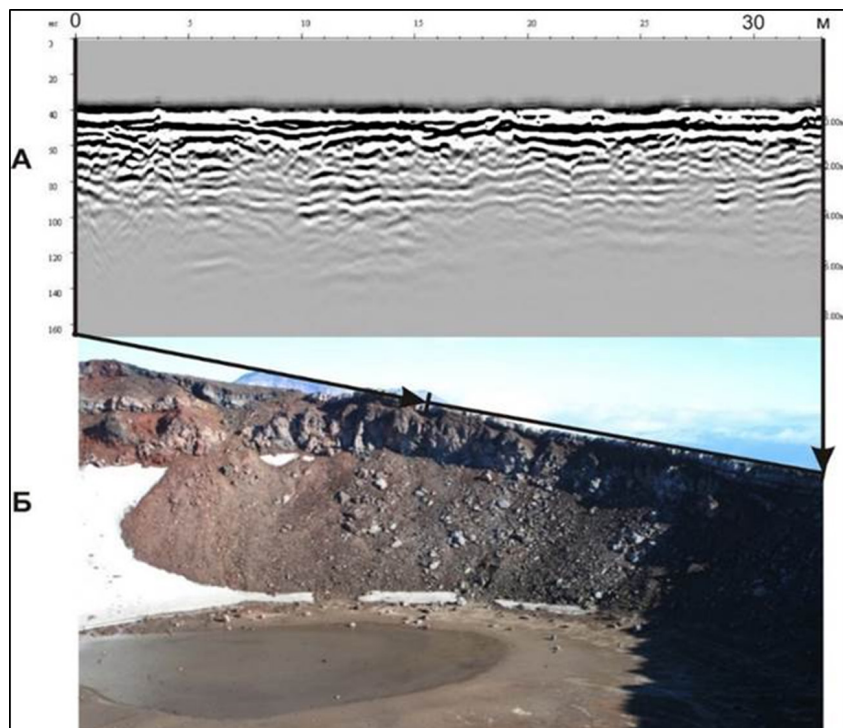


Рис. 3.43. Радарограмма по профилю 2: А – радарограмма, вертикальная шкала слева – время электромагнитной волны, нс, вертикальная шкала справа – глубина, м, горизонтальная шкала – расстояние, м; Б – северо-восточная стенка кратера (постройка вулкана Горелый-3), где черной линией отмечены границы профиля 2

Программа GeoScan32 кроме визуализации радарограмм дает возможность проведения некоторой дополнительной обработки и отображения данных зондирования. Однако этот функционал весьма ограничен. Рассмотрим некоторые доступные методы:

Преобразование Гильберта. Известно, что преобразованием вещественного сигнала Гильберта не что иное, как импульсная характеристика линейного фильтра, на выходе которого формируется ортогональное дополнение входного сигнала. Модуль преобразования Гильберта дает огибающую сигнала, а его аргумент

имеет смысл мгновенного значения фазы. По результату нельзя получить информацию о знаке отражения. Однако можно проанализировать волновую картину на наличие помех. Примеры визуализации модуля преобразования Гильберта в программе GeoScan32 приведены на рис. 3.45.

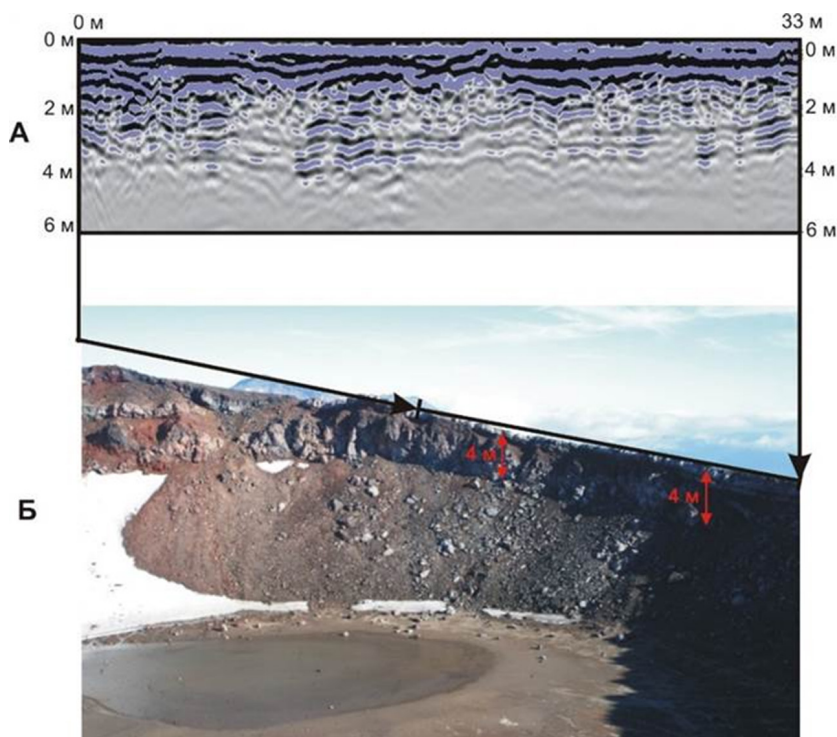


Рис. 3.44. Интерпретация радарограммы по профилю 2: А – радарограмма, вертикальная шкала – глубина, м, горизонтальная шкала – расстояние, м; Б – северо-восточная стенка кратера (постройка вулкана Горелый-3), где черной линией отмечены границы профиля 2. Выделенные отложения соответствуют вулканическим пеплам и андезито-базальтам

Преобразование Фурье. Программа GeoScan32 позволяет представить сигналы на радарограмме не только в волновых, но и в частотных формах, через вычисление преобразования Фурье (рис. 3.46).

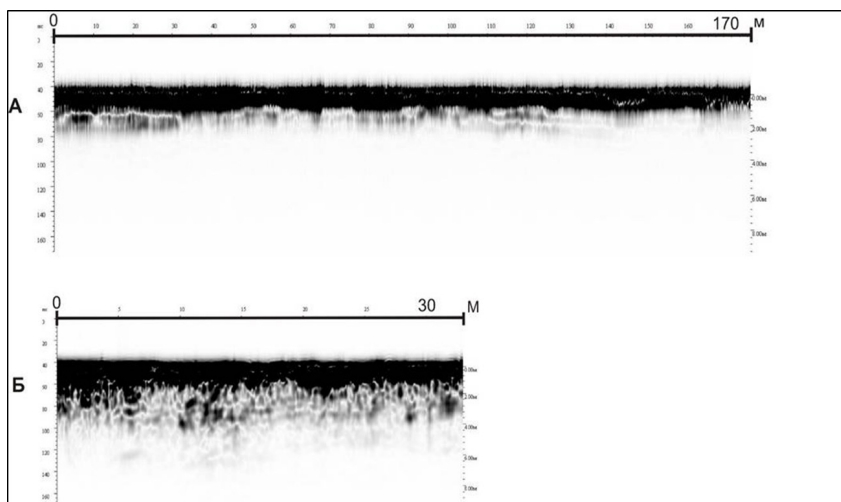


Рис. 3.45. Выделение огибающей (преобразование Гильберта):
 А – радарограмма по профилю 1, Б – радарограмма по профилю 2,
 вертикальная шкала слева – время электромагнитной волны, нс,
 вертикальная шкала справа – глубина, м, горизонтальная шкала – расстояние, м

В результате на радарограммах при таком отображении верхняя часть изображения представляет собой амплитудный спектр, а нижняя часть изображения – соответствующий ему фазовый спектр. Фазовый угол, отображаемый в поле спектра, лежит в пределах от π до $-\pi$ радиан. Однако для улучшения визуализации при отображении фазы используется масштабирование с коэффициентов 104. Таким образом, на визирке в фазовой части спектра можно наблюдать циклические изменения кривой от $+104\pi$ до -104π , что соответствует обычному вращению фазы. Способ отображения позволяет достичь цели обработки – найти сигнал, несущий информацию о расположении объектов и знаке отражения.

С помощью визирки можно увидеть параметры сигнала в виде отклика среды на посылку импульса передающей антенны (пример, рис. 3.47, 3.48).

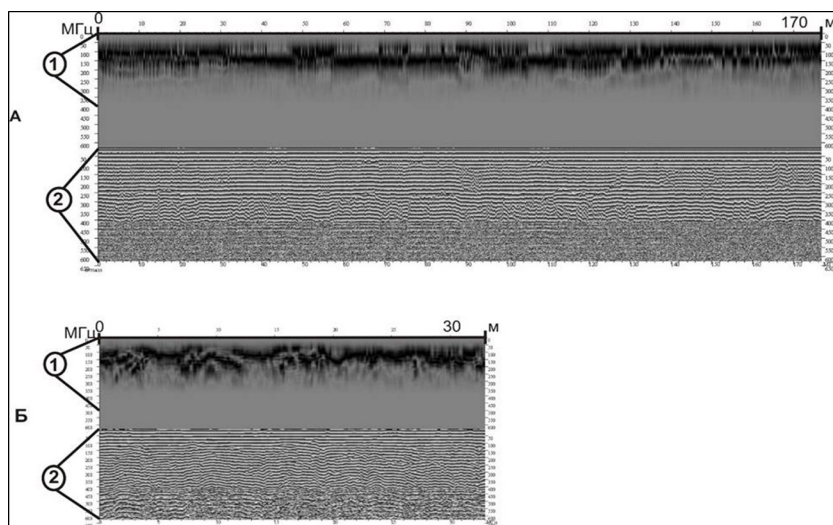


Рис. 3.46. Поле спектров (преобразование Фурье):
А – по профилю 1; Б – по профилю 2.
Цифры в кружочках: 1 – амплитудный спектр; 2 – фазовый спектр

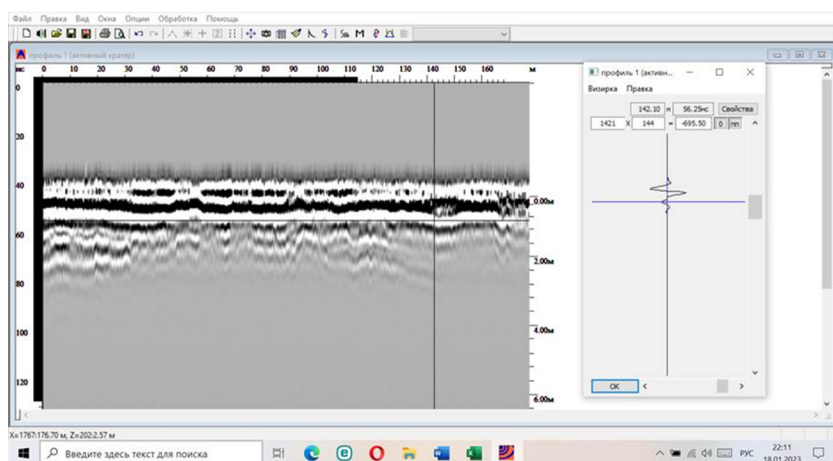


Рис. 3.47. Пример положения визирки (справа) на радарограмме (слева):
56.25 наносекунд, положение трассы 142.10 метра,
амплитуда отраженного сигнала -695.50 (белая полуволна)

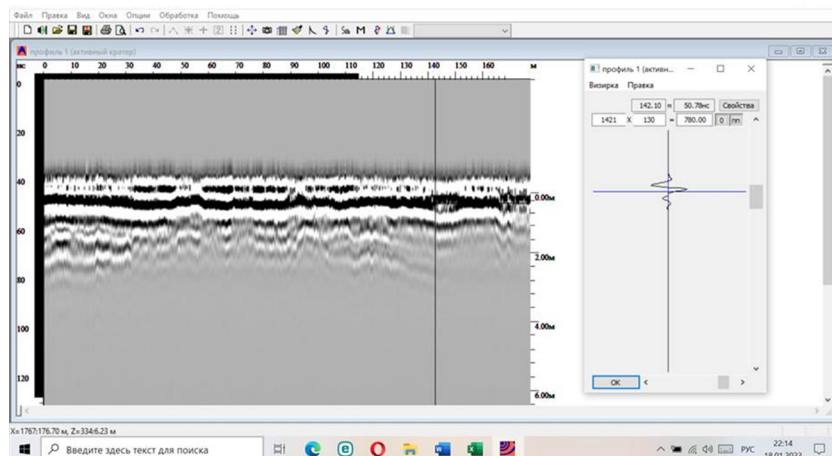


Рис. 3.48. Пример положения визирки (справа) на радарограмме (слева):
50.78 наносекунд, положение трассы 142.10 метра,
амплитуда отраженного сигнала 780.00 (черная полуовална)

Ясно, что для проведения анализа радарограмм с привлечением различных математических методов, необходимо иметь данные в цифровой форме. Программа GeoScan32 позволяет конвертировать данные из внутреннего формата в текстовый формат. (рис. 3.49). С данными в таких файлах можно проводить уже любые математические манипуляции, как с помощью различных программных пакетов анализа данных, так и с помощью собственных авторских программ.

По итогам данной работы можно сделать следующие основные выводы:

1. Метод георадиолокации возможно применять в кратерах активных вулканов для геологического картирования приповерхностных отложений.
2. Следует применять прибор георадар с более низкой центральной частотой, что обеспечит большую глубину зондирования.
3. Представленные методы дополнительной обработки радарограмм позволяют детально проанализировать волновую картину. Их выбор будет зависеть от поставленных целей, решаемых задач и возможностей программного обеспечения.

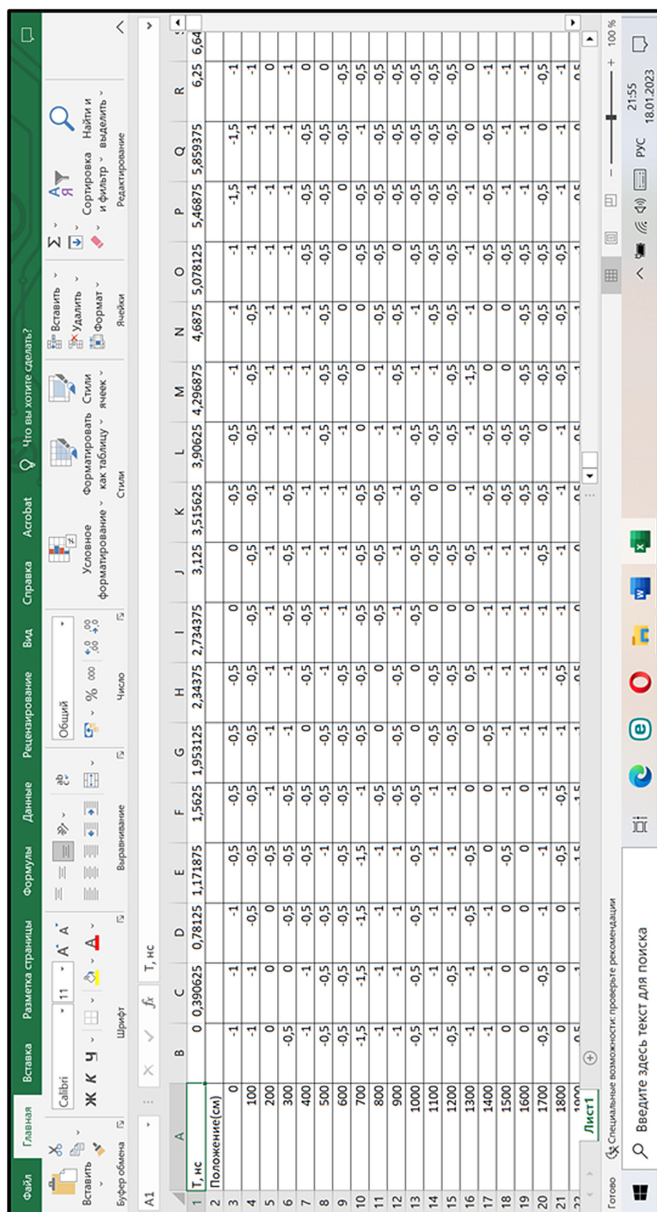


Рис. 3.49. Радарограмма профиля 1 в цифровой форме

§3.8. Результаты георадарных исследований на территории Север-Мутновской вулcano-тектонической зоны

Район исследования расположен в юго-восточной части полуострова Камчатка. Здесь расположены вулканы Мутновский, Горелый, Вилучинский. Исследуемый участок расположен на территории Северо-Мутновской вулcano-тектонической зоны. Общая протяженность георадарных исследований составила 420 метров, что связано со сложным рельефом и небольшой равнинной территорией, где можно было провести измерения с помощью георадара (рис. 3.50). Северо-Мутновский район раньше рассматривался как перспективный, поэтому на участке Пенистый была пробурена глубокая рекогносцировочная скважина. Но она оказалась непродуктивной. Однако сейчас делается упор на детальное изучение этого района с целью наращивания ресурсов теплоносителя Мутновского месторождения парогидотерм.

Согласно исследованиям Кирюхина и других авторов на данной территории температура на глубине составляет до 125 °С. При бурении здесь не обнаружены продуктивные зоны, поэтому имеющиеся ранее скважины являются ликвидированными [130].

В позднелайстоцен-голоценовое время во всех районах происходит формирование новейшей сети разломов северо-северо-восточного (ССВ 20-30°) и менее выраженного субширотного (ЗСЗ 280-300°) простираний. Так же как среднелайстоценовые разломы северо-восточного простирания, эти разломы формируют раздвиги, выраженные на поверхности грабенообразными структурами. Их необходимо рассматривать как поверхностное проявление Восточно-Камчатского глубинного разлома, выделенного многими авторами. В позднем лайстоцене-голоцене вдоль этого разлома произошла активизация, выразившаяся в образовании новейшей зоны растяжения [66].

В формировании геотермального резервуара главную роль сыграла образованная субмеридиональными сбросами грабенообразная депрессия, осевая часть которой проходит через кратеры Мутновского вулкана и далее на север, названная Северо-Мутновской вулcano-тектонической зоной.

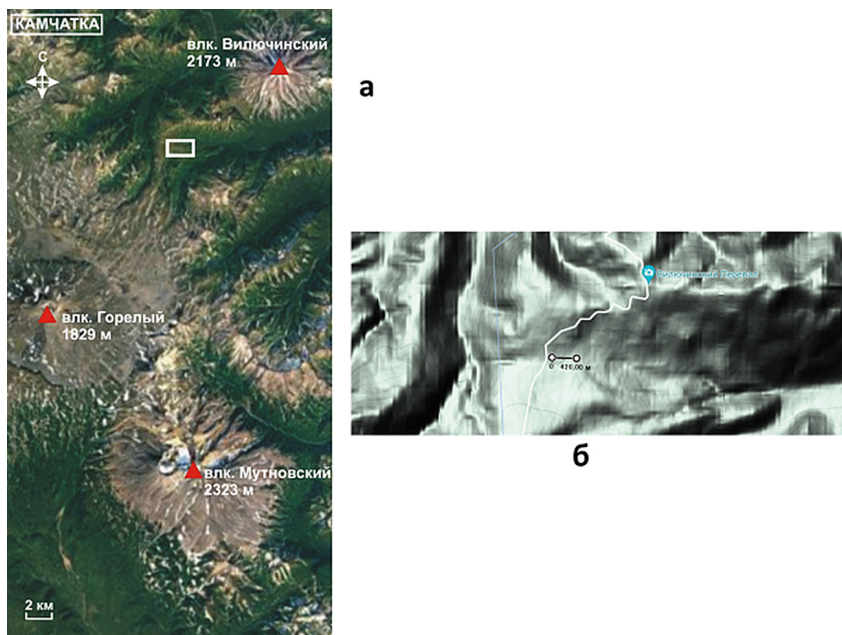


Рис. 3.50. Территория исследования: а – Карта района вулканов Вилучинский, Горелый, Мутновский. Исследуемый участок отмечен прямоугольником; б – Участок работ. 420 м – общая протяженность георадарных исследований

Грabenобразная депрессия Северо–Мутновской вулкано–тектонической зоны – часть субмеридионального глубинного разлома. По данным исследований ряда авторов здесь выделяется предполагаемые тектонические нарушения [80].

На данный момент важны детальные исследования условий геолого–структурной локализации гидротермальных систем и близлежащих территорий для определения проведения детальных разведочных работ на геотермальных месторождениях Камчатки. Метод георадиолокации как раз помогает в выявлении геолого–структурных особенностей исследуемых территорий и в последнее время стал применяться для этих целей на Камчатке.

На территории Северо–Мутновской вулканотектонической зоны имеются небольшие озера, характерны неровности рельефа в виде

пологих склонов, а также наблюдаются трещинные зоны. На поверхности встречаются обломки игнимбритов трещинных ареальных извержений, андезитов, дацитов, риолитов, а также слои вулканический пеплов разного состава (рис. 3.51).



Рис. 3.51. Исследуемый участок: 1 – почвенно-растительный покров; 2 – озера; 3 – обнажения горных пород; 4 – трещинные зоны

На радарограммах по конфигурации и корреляции осей синфазности волновая картина представлена рыхлыми отложениями в виде субгоризонтального расположения – это чередование слоев супесчаного состава с включениями крупнообломочного материала. Многие обломки покрыты железистыми корками. По описанию шурфов разрез представлен чередованием вулканических песков черного, темно-серого, желтого цвета с примесью гравия пемзы. Все это указывает на долгий период вулканической деятельности на данной территории, что, соответственно, за длительный период времени привело к накоплению разного состава вулканических отложений (рис. 3.52).

На радарограммах хорошо выделяется участок влагонасыщенных отложений в виде понижения, расположенного у ручья Пенистый и небольших озер. Отложения аккумулятивных равнин, где встречаются вулканические пески, на радарограмме представлены в виде горизонтального расположения осей синфазности, последовательно залегающих друг на друга (рис. 3.53).

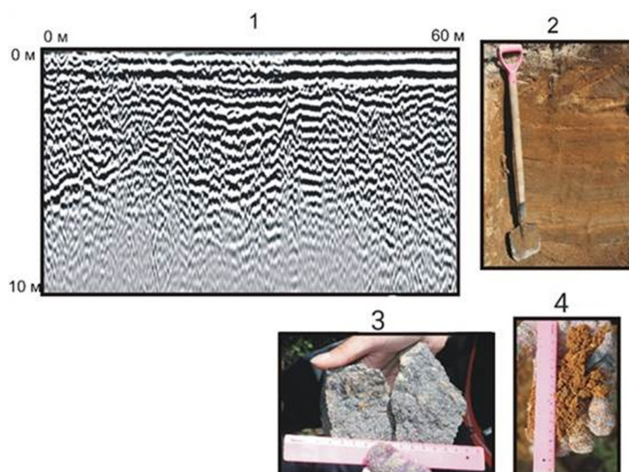


Рис. 3.52. Обработка радарограммы: 1 – радарограмма; 2 – переслаивание слоев вулканического пепла разного состава; 3 – образец горной породы; 4 – почвенный слой с включениями крупнозернистого песка

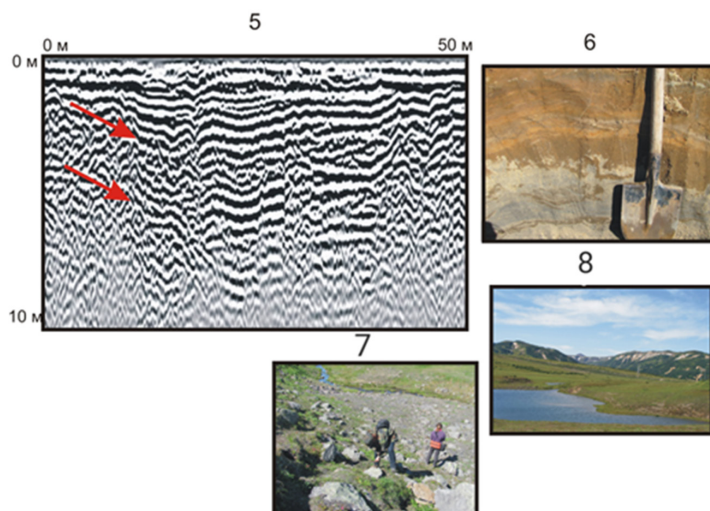


Рис. 3.53. Обработка радарограммы: 5 – радарограмма; 6 – переслаивание слоев вулканического пепла разного состава; 7 – ручей Пенистый; 8 – озера

На радарограммах выделяются чашеобразные мульды со смятием слоев в складки. Границы слоев согласны друг другу, но при этом выделяются угловые несогласия. В вертикальном сечении форма зон увлажнения куполовидная, с суживающимися в направлении земной поверхности вершинами (рис. 3.54).

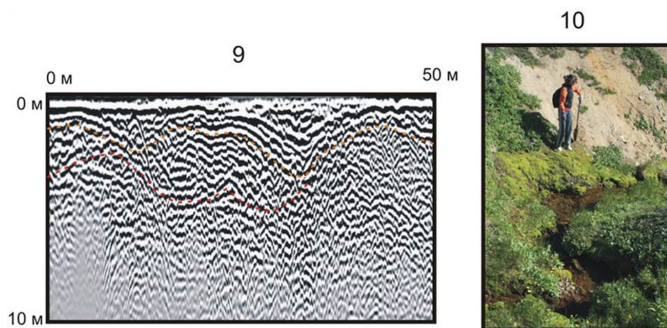


Рис. 3.54. Обработка радарограммы:
9 – радарограмма; 10 – трещинные зоны

На радарограммах хорошо выделяются участки с наклонным залеганием слоев и видимым нарушением их параллельности с резким смещением относительно друг друга, что указывает на наличие не предполагаемых, а явных разрывных нарушений, имеющих на этой территории (рис. 3.55).

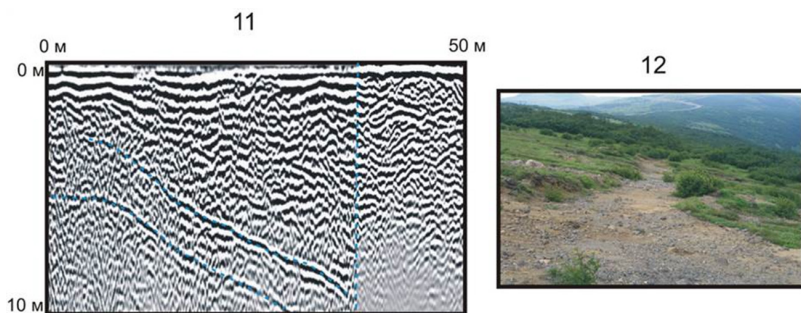


Рис. 3.55. Обработка радарограммы:
11 – радарограмма; 12 – разрывные нарушения

По полученным результатам исследования можно сделать следующие выводы:

Особенности детального геологического строения приповерхностной территории по данным метода георадиолокации: переслаивание слоев вулканического пепла разного состава с включениями крупнообломочного материала; аккумулятивные отложения; трещинные зоны; разрывные нарушения. Эти особенности указывают на длительные процессы тектономагматической активности на этой территории и на явные признаки геолого-структурной локализации геотермального района. Однако это исследование приповерхностной части, но даже эти результаты указывают на важность проведения детального глубинного исследования.

Метод георадиолокации является важным методом для детального изучения территории и картирования геологических структур вулканических областей Камчатки. Однако исследования стоит проводить в комплексе и с георадаром большей глубиной зондирования и низкой центральной частотой. Поскольку вулканические отложения имеют сложное геологическое строение, то интересно изучать всю толщу этих отложений, а также сам вулканический рельеф.

§3.9. Изучение пемзовых отложений района горы Тарбаганья на Камчатке с помощью метода георадиолокации

Район исследуемых пемзовых отложений расположен в юго-восточной части полуострова Камчатка между активными вулканами Мутновский (2323 м) и Горелый (1829 м) (рис. 3.56). Пемзовые отложения расположены в районе гор Пемзовая и Тарбаганья. Относительные высоты этих гор – 60 и 50 м, абсолютные – 1076 и 997 м. Общая площадь пемзовых отложений – около 8 км².

Вулкан Мутновский по форме и геологическому строению представляет собой хребтообразный горный массив, состоящий из четырех усеченных небольшими вершинными кальдерами конусов-стратовулканов (Мутновский-1–4).

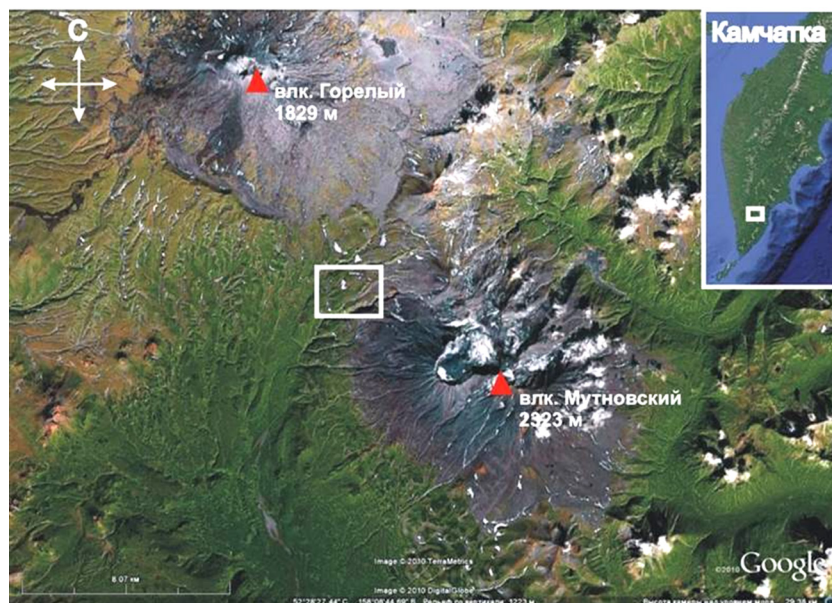


Рис. 3.56. Карта района вулканов Горелый и Мутновский (Камчатка).
Исследуемый участок отмечен прямоугольником

Три ранних конуса вулкана Мутновский сложены породами ряда базальт – андезит – риодацит, четвертый – базальтами. Современный вулкан Горелый имеет три конуса, состоящих соответственно из базальтов–андезитов, базальтов–дацитов и андези-базальтов. Он состоит из трех длительно действовавших конусов (Горелый-1–3) и более чем трех десятков конусов одноактных про-рывов. Все сооружение располагается в обширной кальдере, имеющей овальную, удлинённую к северо-западу форму и размеры по осям 9х13 км, площадью около 100 км². Актуальные вопросы о генезисе пемзовых отложений в этом районе: покров или экструзия; в результате какого извержения вулкана образовались эти отложения (вулкан Горелый или Мутновский); если вулкан Мутновский, то к какому этапу извержения вулкана Мутновского эти отложения относятся. Изучение этих отложений помогает в выяснении характера вулканической деятельности исследуемой области.

Вот что известно и что утверждают разные исследователи. По Святловскому А.Е. и Марениной Т.Е. (1952 г.), «гора Тарбаганья – это пемзовые отложения, сложенные цементированными пемзовыми туфами, имеющими матрасовидную или глыбовую отдельность, возникшую благодаря цементации». Образование пемзовых покровов в рассматриваемом районе связывают с эксплозивной деятельностью вулкана Мутновский. По данным Шарапова В.Н., Симбирева И.Б. и др. (1979 г.), «горки Пемзовая и Тарбаганья – типичные трещинные (экструзивные) образования, верхняя часть которых состоит из застывших вспененных лав». По Селянгину О.Б. (2009 г.), «г. Тарбаганья представляет собой пемзовый покров, образовавшийся в ходе кальдерообразующего извержения вулкана Мутновский-3. Этот покров включает слоистые отложения пемзопадов (тефру) и несортированные, неслоистые отложения пирокластических потоков. В местах наибольшей мощности они сцементированы в трещиноватый монолит спеканием или, возможно, гидрoхимической цементацией. Отдельные горизонты пемз прослоены отложениями сопровождавших извержение крупно-глыбовых грязекаменных потоков (лахаров)». По последним данным Топчиевой О.М., Мостовой Т.В. и Петровского В.А. (2014 г.), пемзовые покровы территориально и морфологически привязаны к Мутновскому вулкану. Покров горы Тарбаганья сложен пемзовыми туфами андезитового состава и сильно эродирован. В восточной части покрова пемзы имеют дацитовый состав. По данным петрографических и геохимических исследований образцов горных пород авторы делают вывод, что приписать исследованные пемзы конкретному вулкану – Горелому или Мутновскому – пока не представляется возможным. Не исключено, что исследованные пемзы вообще относятся к разным фазам или стадиям извержения.

Метод георадиолокации помогает в детальном изучении отложений в их естественном залегании. В данном случае, помогает в картировании геологических структур. Глубина зондирования составила до 6 м. Всего пройдено 12 профилей. Непосредственно 8 профилей на самой горе, 4 – у подножия. Минимальная длина профиля составила 30 м, максимальная – 500 м (рис. 3.57).

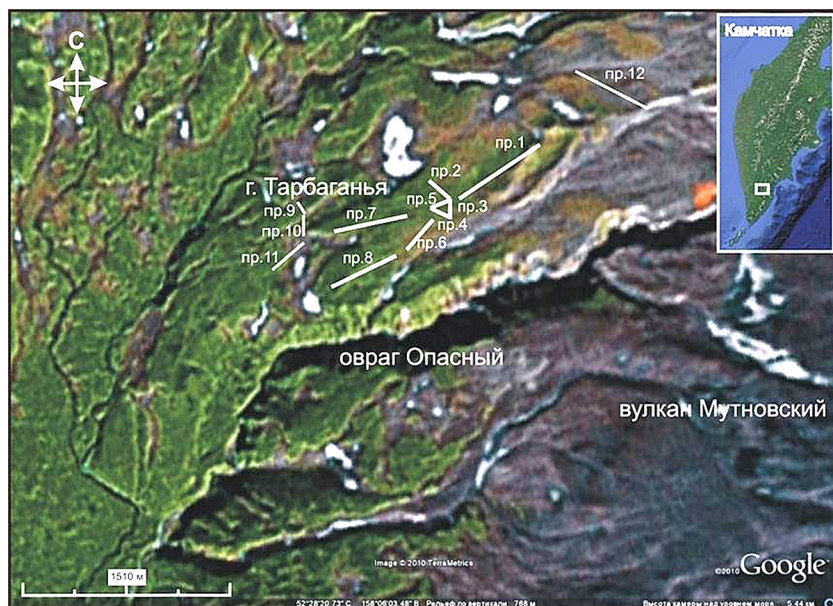


Рис. 3.57. Схема георадарных профилей (гора Тарбаганья)

Результаты исследования представлены на рисунке 3.58. Все радарограммы, сделанные непосредственно на поверхности горы Тарбаганья, имеют схожую волновую картину. По конфигурации и корреляции осей синфазности на радарограммах можно уверенно выделить три слоя (Б). И так на всей ее поверхности. Установлено субгоризонтальное залегание пемзовых отложений. Характерен контраст в значениях диэлектрической проницаемости¹². Расчет скорости распространения электромагнитной волны (V , см/нс) и значения диэлектрической проницаемости (E) представлены в таблице 3.2. Верхняя часть разреза представлена монолитными, слабо трещиноватыми дациандезитами, с глубиной эти породы сменяются на влагонасыщенные, проницаемые, трещиноватые.

¹² Максимальный контраст в диэлектрической проницаемости наблюдается между воздухом (1) и водой (81). Их соотношение в породе и будет определять диэлектрическую проницаемость слоя.

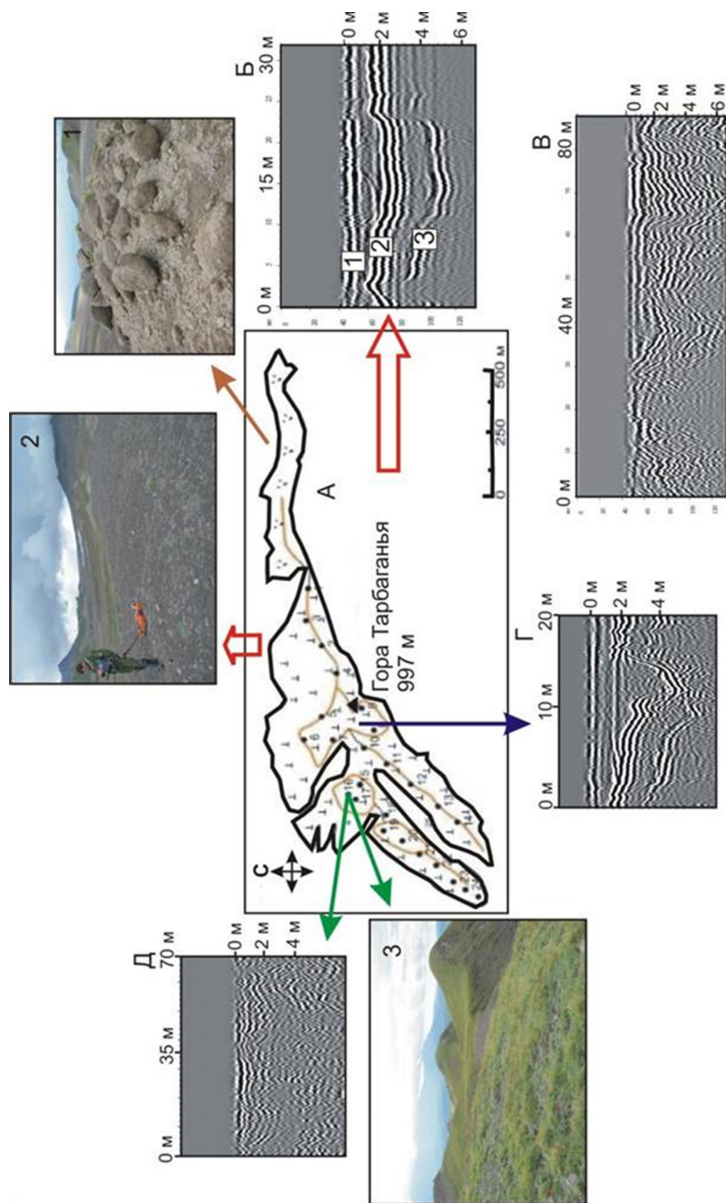


Рис. 3.58. Результаты работы: А – схема расположения пемзовых покровов в окрестностях горы Тарбаганья (по данным Топчиевой О.М., Мостовой Т.В. и Петровского В.А., 2014 г.); Б, В, Г, Д – радарограммы (вертикальная шкала – глубина в м, горизонтальная шкала – расстояние в м), на радарограмме Б цифры – номера слоев; 1 – пемзы андезитового состава; 2 – пемзы дацитового состава; 3 – растительный покров

Одна особенность, в единственном месте выделяется угловое несогласие в залегании слоев с видимым нарушением параллельности на глубине от 2 до 6 м. На поверхности это никак не проявляется и не выделяется визуально. На северо-западной части горы Тарбаганья есть мощный растительный покров до глубины 4 м (Д). У подножия все радарограммы показывают отложения в виде складчатости с разным углом наклона слоев (В).

Проведено картирование геологических структур – восстановление геометрии относительно протяженных границ. Волновая картина на радарограммах указывает на то, что пемзовые отложения района горы Тарбаганья можно отнести к покрову. Характерно слоистое строение. По данным значений V и E монолитные, слабо трещиноватые отложения с глубиной сменяются на влагонасыщенные, проницаемые, трещиноватые.

Т а б л и ц а 3.2

Расчеты для слоев.

| № слоя | V (см/нс) | E |
|--------|-------------|-------|
| 1. | 10 | 9 |
| 2. | 5 | 36 |
| 3. | 4 | 56.25 |

§3.10. Георадарные фации фронтальной части пемзового потока (подножие вулкана Мутновский)

Понятие «фация» в геологии возникло в 19 веке для обозначения изменений литологического состава горных пород и заключённых в них органических остатков в пределах одного стратиграфического горизонта на площади его распространения. Поскольку это понятие, введенное швейцарским геологом Гресли многостороннее (оно охватывало петрографический состав пород, заключённые в них органические остатки, генезис отложений и их изменения в определённых стратиграфических рамках), то это явилось причиной дальнейшего использования термина «фация» в разных смыслах.

Георадарная фация – это термин георадарной стратиграфии, поверхности радарных отражений, связанные с первичной структурой осаднения. В данной работе исследуем особенности пемзовых отложений, т.е. магматических горных пород. Речь идет о континентальных фациях, а они очень разнообразны, изменчивы как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Поэтому в данном случае, георадарная фация – это особенности волновой картины радарограммы, отражающие генезис отложений и их изменения в определённых стратиграфических рамках.

Район исследуемых пемзовых отложений расположен в юго-восточной части полуострова Камчатка. В основном пемзовые отложения расположены в районе гор Пемзовая и Тарбаганья (рис. 3.59).

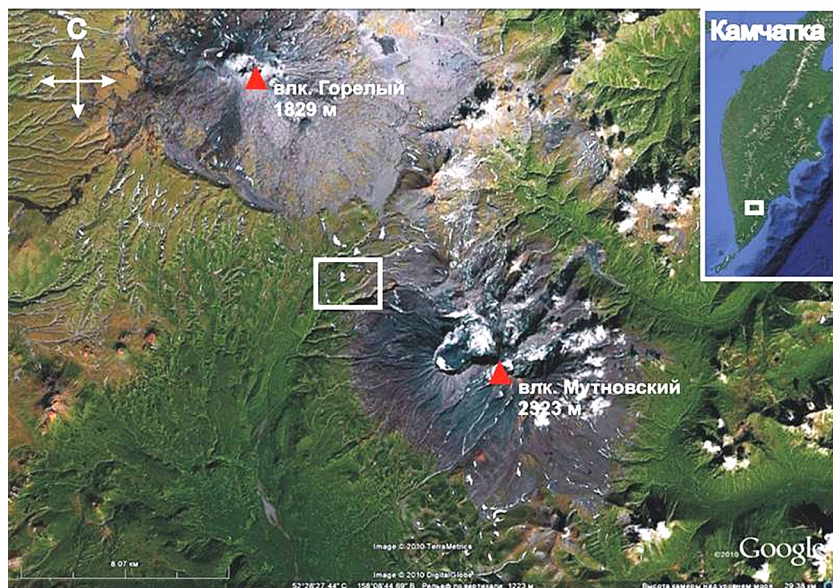


Рис. 3.59 Карта района вулканов Горелый и Мутновский. Исследуемый участок отмечен прямоугольником

С учетом сложного рельефа, пройдены георадарные профили на фронтальной части пемзового потока. Минимальная длина профилей составила 17 м, максимальная – 500 м (рис. 3.60).

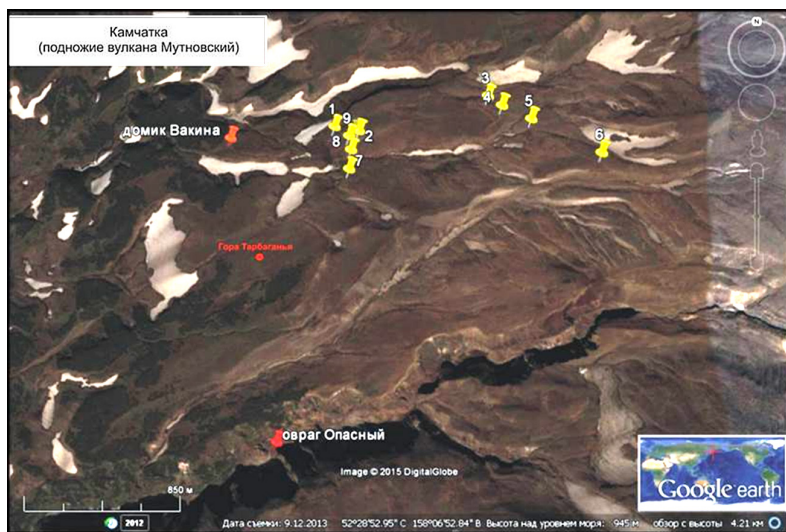


Рис. 3.60. Карта района работ.
Цифры от 1 до 7 – точки георадиолокационных профилей



Рис. 3.61. Подножие вулкана Мутновский

Действие экзогенных процессов сильно проявляется во фронтальной части пемзового потока, а именно, выветривание и действие временных водотоков, поверхностных вод в виде ручьев (рис. 3.61, 3.62).



Рис. 3.62. Район горы Тарбаганья

Такие особенности хорошо проявляются на волновых картинах радарограмм по конфигурации и корреляции осей синфазности. Среди них, в юго-западной фронтальной части пемзового потока, дефляция – это разрушение горных пород под действием ветра, сопровождающееся перенесением и обтачиванием оторванных частиц. В результате образуются выработанные (дефляционные) формы рельефа (рис. 3.63).

Также, на волновых картинах радарограмм по конфигурации и корреляции осей синфазности в северо-восточной части пемзового потока можно выделить следующее: в наименьшей его части

(по площади распространения), эрозия – разрушение горных пород поверхностными водными потоками, включающее в себя отрыв и вынос обломков материала и сопровождающееся их отложением. Эрозия является причиной образования здесь промоин. Отсюда наблюдается и затухание электромагнитных волн с глубиной в следствии большого водонасыщения (рис. 3.64).

В самой юго-западной части пемзового потока по конфигурации и корреляции осей синфазности хорошо выделяется аккумуляция – процесс накопления продуктов разрушения горных пород и рыхлого материала. Отмечено наличие переслаивающихся горизонтов вулканических пеплов, которые перекрывают эродированный в этой части пемзовый поток (рис. 3.65).

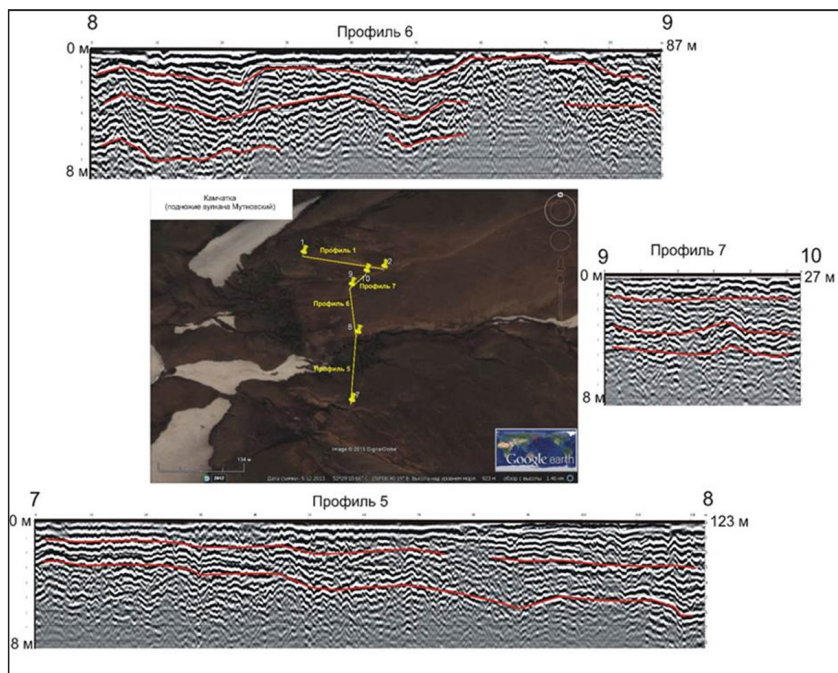


Рис. 3.63. Результаты работы
(юго-западная фронтальная часть пемзового потока)

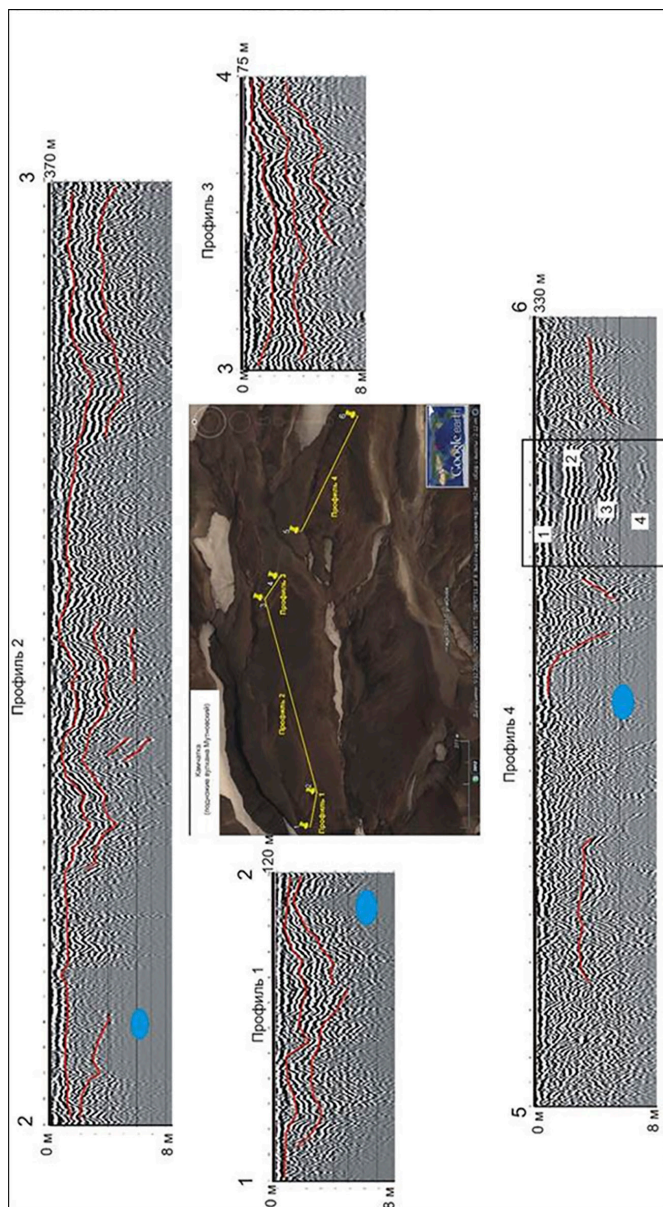


Рис. 3.64. Результаты работы (северо-восточная часть пемзового потока):
цифры 1, 2, 3, 4 – субгоризонтальное залегание пемзовых отложений, соответствующее
отложениям горы Тарбаганя; голубым овалом отмечены участки повышенного водонасыщения

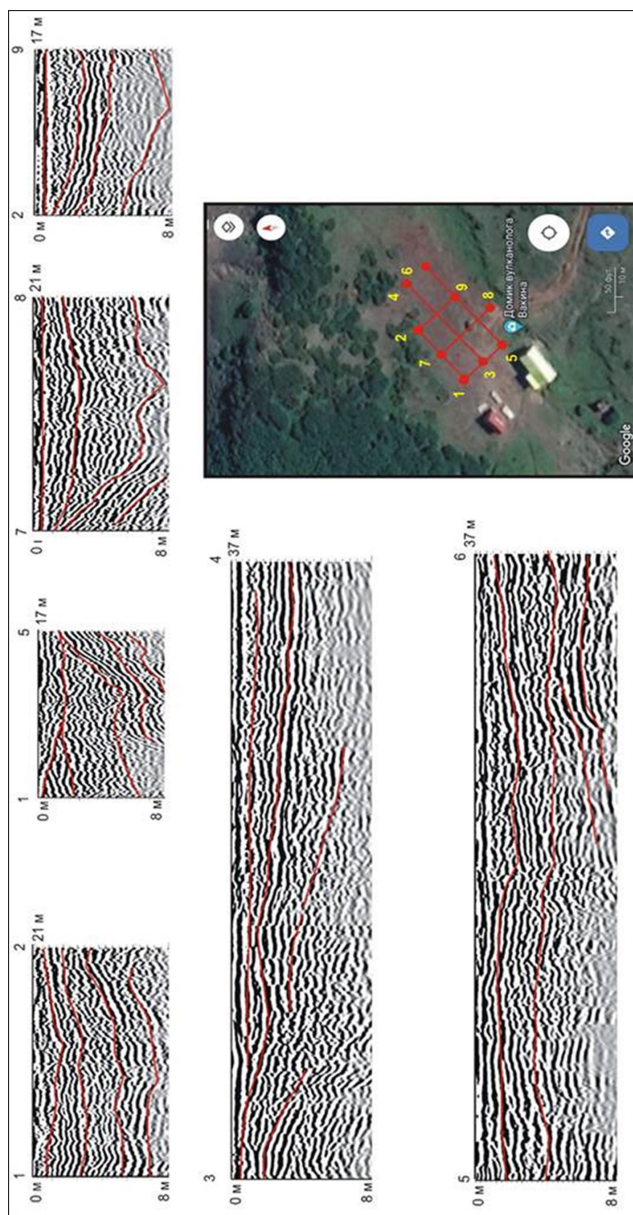


Рис. 3.65. Результаты работы (юго-западная часть пемзового потока)

Таким образом, по результатам проделанных работ можно сделать следующие выводы:

Метод георадиолокации применим для геологического картирования при исследовании вулканических областей.

Стратиграфия фронтальной части пемзовых отложений четко фиксируется на радарограммах: повсеместно выделяются георадарные фации, как правило, четко различающиеся по характеру отражения электромагнитных волн (конфигурация и корреляция осей синфазности).

Георадарные фации в юго-западной фронтальной части пемзового потока характеризуют выработанные (дефляционные) формы рельефа.

Георадарные фации в северо-восточной части пемзового потока характеризуют эрозионные формы рельефа.

Георадарные фации в юго-западной части пемзового потока характеризуют аккумулятивные формы рельефа.

Георадарное профилирование во фронтальной части потока пемз показало, что в строении георадарных фаций отражается субгоризонтальное залегание, а предполагавшееся здесь наличие секущего субгоризонтальные слои рвущего их дайкового тела не установлено. Скорее всего, дайкообразные формы рельефа были сформированы в результате избирательной денудации, когда более устойчивыми оказывались те части потока, которые были более устойчивы к выветриванию за счет цементации пемз кремнеземом при автометасоматозе. Аналогом такого процесса может быть извержение, которое привело к образованию долины и вулкана Новарупта на Аляске в районе вулкана Катмай (США) 6–8 июня 1912 года. По долине названной Долиной Десяти Тысяч Дымов, сошел газонасыщенный раскаленный пемзовый пирокластический поток, на поверхности которого длительное время разгружались фумаролы автометасоматического происхождения. Когда фумаролы угасли, сцементированные ими пемзы оказались более устойчивыми к размыву.

§3.11. Пространственная структура зоны разгрузки на участке Карымшинской гидротермальной системы

Карымшинская гидротермальная система располагается к западу от вулканов Восточно-Камчатского вулканического пояса в пределах долины рек Паратунка и Карымшина и является составной частью Верхне-Паратунской геотермальной системы, приуроченной к зоне гигантской кальдеры древнего потухшего супервулкана, располагающегося между гор Ягодное, Толстый мыс, Горячая, Бабий камень [33; с. 61-76; 64; с. 14-28] (рис. 3.66).



Рис. 3.66. Общая схема расположения Карымшинской гидротермальной системы (Камчатка)

С 1987 г. на участке Карымшинской гидротермальной системы осуществляются непрерывные наблюдения за режимом подземных вод и газов. Комплекс режимных наблюдений производится каждые 6 дней и включает в себя измерения атмосферного давления

и температуры воздуха, измерения температуры и расхода воды самоизливающихся скважин (ГК-5; ГК-15; ГК-44; К-44 и ГК-17), отбор проб воды и газа для последующего их анализа в лабораторных условиях на базе аналитического центра ИВиС ДВО РАН. Структурно зона Карымшинской гидротермальной системы приурочена к разломам и к узлам крупных тектонических нарушений, что позволяет использовать ее для изучения при выявлении предвестников землетрясений [60; с. 328-342, 61].

Источники часто посещают туристы, поскольку имеются два бассейна, наполняемые термальной водой из скважины ГК-5. Скважина ГК-5 входит в число 4-х самоизливающихся скважин станций «Верхняя Паратунка». Бурение скважины проводилось с 4 ноября 1966 г. по 17 февраля 1967 г. По окончании бурения глубина скважины составила 900 м, температура в устье 74°C, химический состав воды – гидрокарбонатно-сульфатный, кальциево-натриевый [18; с. 345-347].

Результаты комплексных геофизических исследований в этом районе [70; с. 185-200], в дополнение с георадиолокацией, позволили увидеть строение зоны разгрузки на участке Карымшинской гидротермальной системы.

Геологическая и гидрогеологическая характеристика района исследований. Структурная позиция этой системы определяется пересечением сброса-сдвига, протягивающегося вдоль оси этой долины с поперечным к нему разломом (рис. 3.67).

Термальные воды приурочены к резервуару, представленного трещинно-жильной зоной в пределах вулканических отложений миоцен-плиоценового возраста (кислые туфы).

Геофизическая характеристика района исследований. По результатам проведения комплексных геофизических исследований выделяются аномалии северо-восточного простираия. Отмечено, что это может быть связано с зоной трещиноватости и разгрузки воды в верхней части разреза [70; с. 185-200].

Работы были произведены в два этапа. В ходе первого этапа была разбита и привязана с помощью GPS регулярная сеть. Площадные измерения были выполнены в 102 точках, в узлах регулярной сети 10×10 м.

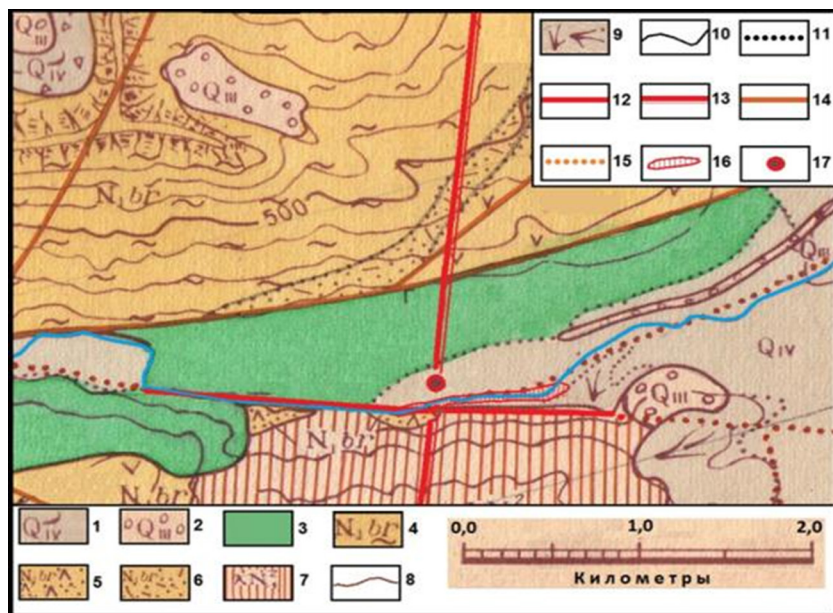


Рис. 3.67. Структурная позиция зоны разгрузки Карымшинской гидротермальной системы (Камчатка): 1 – четвертичные отложения (голоцен), делювиальные, коллювиальные и пролювиальные отложения; 2 – четвертичные отложения (голоцен), гляциальные и флювиогляциальные отложения; 3 – четвертичные отложения (голоцен), базальты; 4 – миоцен, березовская свита, игнимбриты и спекшиеся туфы; 5 – миоцен, березовская свита, туфы основного состава; 6 – миоцен, березовская свита, туфы кислого состава; 7 – верхний миоцен, кислые экструзии и субвулканические тела; 8 – изолинии рельефа; 9 – конуса выноса у подножия склонов; 10 – геологические границы; 11 – фациальные границы; 12 – субширотный термоконтролирующий разрыв; 13 – субмеридиональный термоконтролирующий разрыв; 14 – другие разрывы; 15 – разрывы, перекрытые чехлом рыхлых отложений; 16 – трещинная зона; 17 – скважина ГК-5

В дальнейшем были выполнены георадиолокационные исследования. Современная георадиолокационная съемка в пределах Карымшинской гидротермальной системы проведена впервые. Георадиолокационные исследования проведены на площадке «Теплые земли» (рис. 3.68), размером 50×140 м с помощью георадара «ОКО-250».



Рис. 3.68. Схема расположения георадарных профилей на участке «Теплые земли» (Карымшинская гидротермальная система, Камчатка)
 Цифрами обозначены номера профилей:
 от 0 до 5 – магистральные, от 0 до 14 – ортогональные

Интерпретация георадарных профилей. Непосредственно на поверхности залегают рыхлые отложения коллювиального, флювиогляциального и аллювиального происхождения, и лишь в южной части площадки георадарных исследований вдоль кромки террасы выходят на поверхность скальные породы и их элювий (рис. 3.69). Для радарограмм характерно субгоризонтальное и хаотическое расположение осей синфазности и наличие отраженных электромагнитных волн до глубины 4 м, затем наблюдается их затухание с глубиной. Это обуславливает залегание несортированных валунно-галечниковых отложений, затем – массивных туфов. Местами выделяются зоны трещиноватости представленные на радарограммах проходящей волной (рис. 3.70, 3.71). На основе анализа радарограмм (по магистральным профилям) построены литологические разрезы (рис. 3.72). Для отложений характерны средние значения диэлектрической проницаемости равные 2.9 – 5, средняя скорость распространения электромагнитных волн равна 14 см/нс. Границы выделены по геометрии осей синфазности на радарограммах.

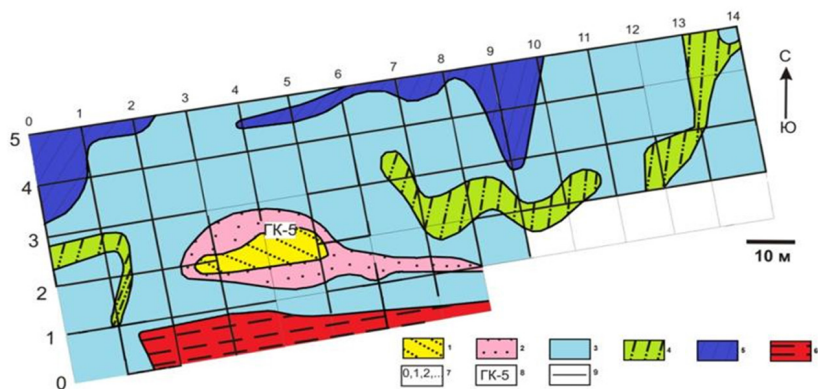


Рис. 3.69. Геоморфологическая схема площадки проведения георадарного профилирования: 1 – техногенно нарушенный рельеф; 2 – локальные поднятия в микрорельефе; 3 – первая надпойменная терраса реки Карымшина; 4 – инверсионный рельеф реликтов флювиогляциальных ложбин стока; 5 – глыбовые россыпи коллювиального происхождения, местами перекрытые отложениями террасы; 6 – элювий скальных пород; 7 – номера профилей; 8 – скважина ГК-5; 9 – георадиолокационные профили

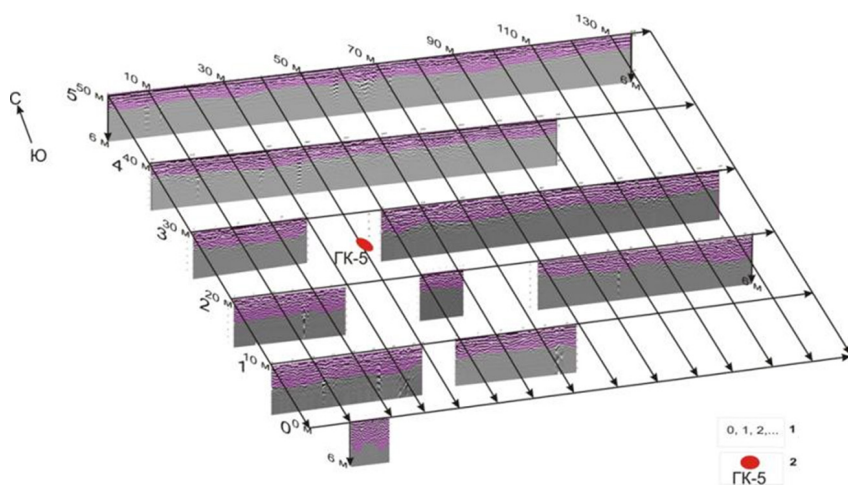


Рис. 3.70. 3D-модель по магистральным профилям:
1 – номера профилей; 2 – скважина ГК-5

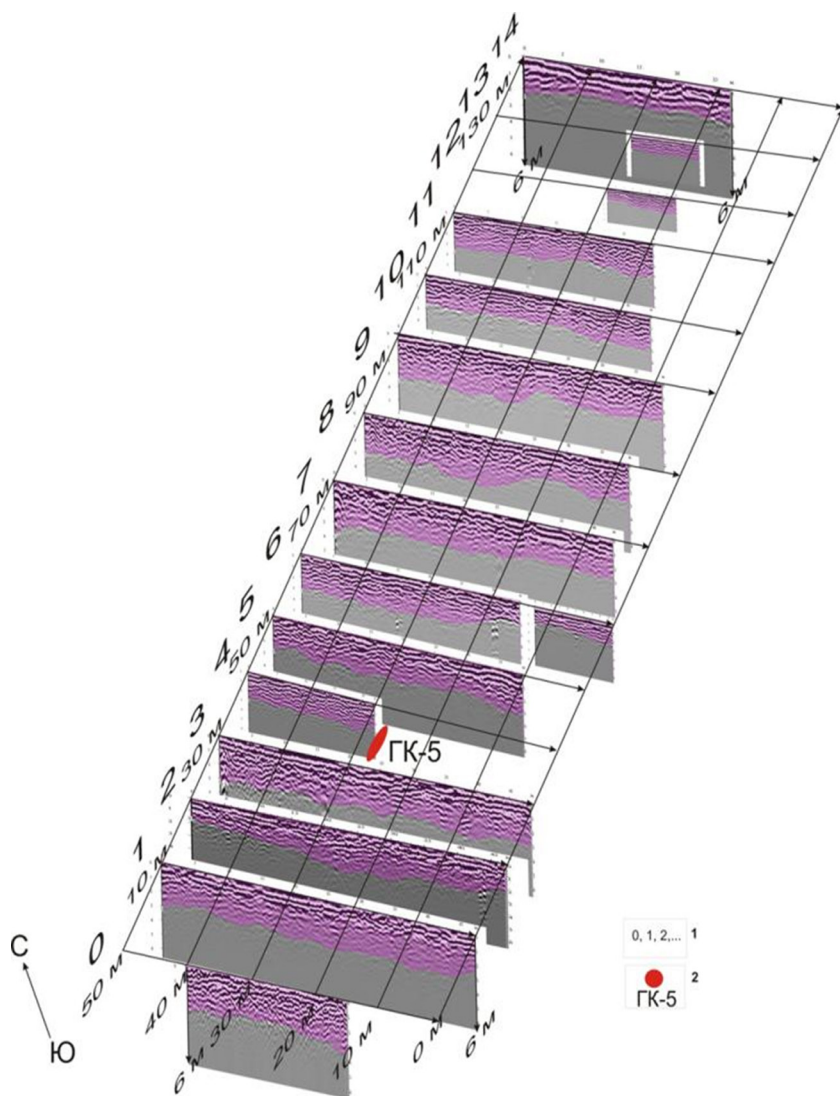


Рис. 3.71. 3D-модель по ортогональным профилям:
1 – номера профилей; 2 – скважина ГК-5

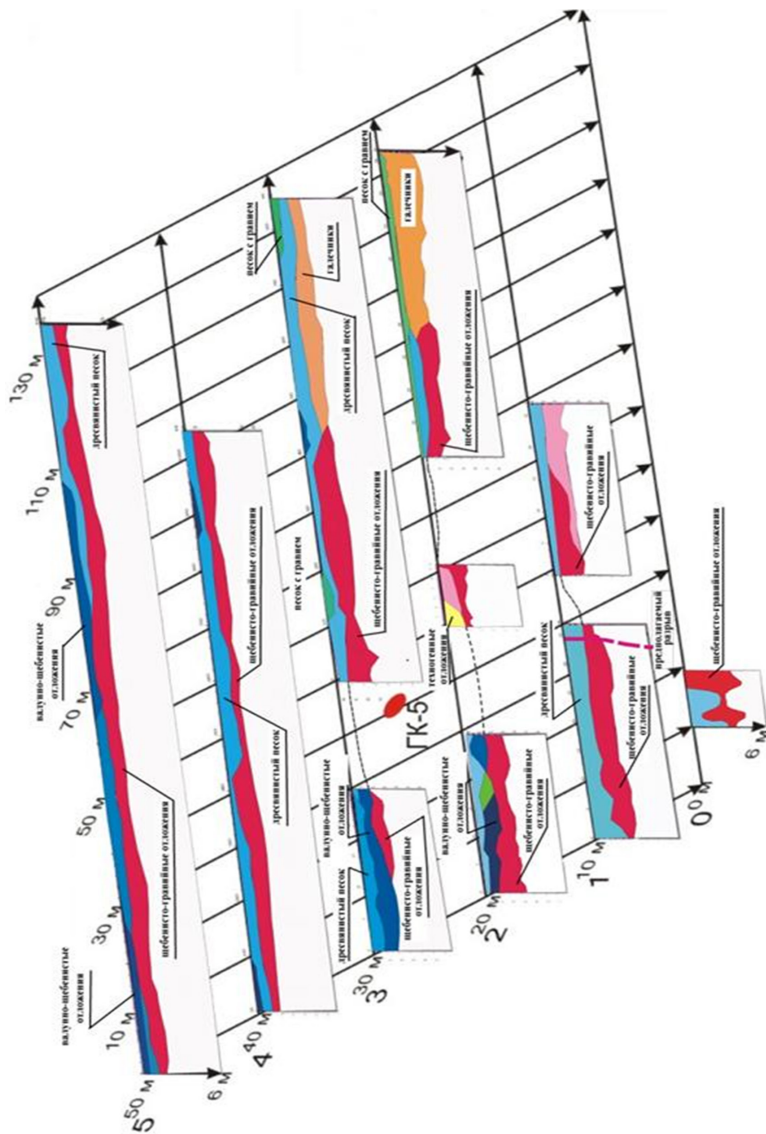


Рис. 3.72. 3D-модель по магистральным профилям:
1 – номера профилей; 2 – скважина ГК-5

Интерпретация диаграммы метода потенциалов собственной поляризации (ПС)¹³. В скважине ГК-5 (рис. 3.73) наблюдается чередование практически равных отрицательных (среднее -25 мВ) и положительных (среднее +25 мВ) по значению ПС до глубины 850 м.

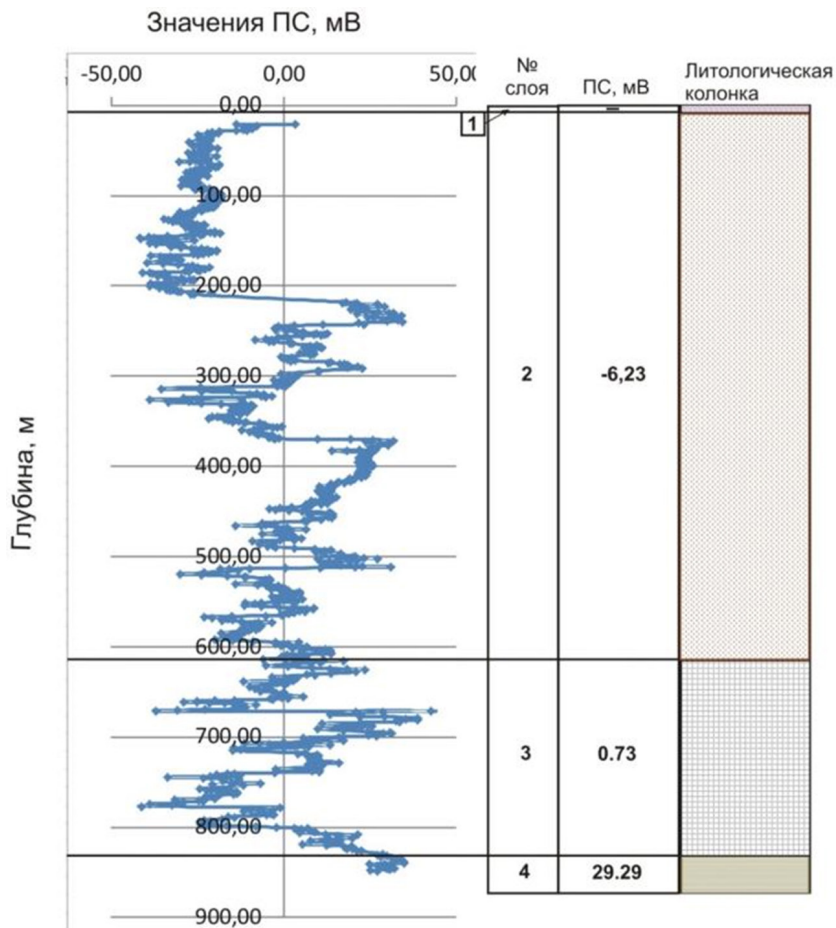


Рис. 3.73. Диаграмма ПС по скважине ГК-5

¹³ Гамма-каротаж в скважине не проводился.

До глубины 615.4 м находятся андезиты, туфы средне-крупно-обломочные андезитового состава с прослоями туфов крупнообломочных смешанного состава. Эти породы трещиноватые, участками брекчированные. Для них характерно среднее значение ПС равное -6.23 мВ. В основном это связано с незначительным оттоком жидкости по трещиноватым зонам. Далее, до глубины 838.5 м находятся базальты порфировые трещиноватые, а в интервале 685-699 м – туфы грубо-крупнообломочные смешанного состава. Отмечаются трещины шириной ≤ 1 мм, редко до 3 мм, субвертикальные, субгоризонтальные. Для этого слоя характерно среднее значение ПС равное 0.73 мВ. В основном это связано с незначительным притоком жидкости по трещиноватым зонам. Следующий слой до глубины 877.4 м – это аргиллиты интенсивно трещиноватые, а в интервале 846.7-853.2 м – базальты. Характерно среднее значение ПС равное 29.29 м. В этих глубинах отмечается значительный приток жидкости. Можно сделать предположение, что далее значения ПС будут отрицательными, поскольку до глубины 900 м залегают андезиты мелкопорфировые слабо трещиноватые, трещины субвертикальные и субгоризонтальные. А этот слой подобен слою до глубины 615.4 м.

Таким образом, на участке Карымшинской гидротермальной системы (Камчатка) в районе скважины ГК-5 по данным метода георадиолокации до глубины 4 м выявлены зоны трещиноватости. По данным интерпретации диаграммы метода потенциалов собственной поляризации скважины ГК-5 при переходе от пород среднего (андезиты) к породам основного состава (базальты) среднеарифметическое значение потенциалов собственной поляризации увеличивается.

Выводы по главе 3

На основе применения георадиолокации на Камчатке можно сделать следующие основные выводы:

1. Выявлена локализация мелких и замкнутых неоднородностей, распространенных в приповерхностной части разреза грунтов города Петропавловск-Камчатский.

2. Толща рыхлых отложений на территории города Петропавловск-Камчатский представляет собой верхний структурный этаж, состоящий из рыхлых слоистых отложений различного генезиса: насыпных, морских, лагунных и др., мощностью до первых десятков метров.

3. На территории города Петропавловска-Камчатского в приповерхностной части распространен сухой щебенистый грунт с низкими значениями диэлектрической проницаемости, крупнозернистые более водонасыщенные пески и дресвяный грунт разной степени водонасыщения (приложение 5). Полученные результаты дополняют данные по физико-механическим свойствам грунтов (приложение 6).

4. Полученные характеристики волновой картины различных геологических структур объектов Камчатки могут быть использованы как эталоны при интерпретации радарограмм при проведении исследований методом георадиолокации в вулканических районах и зонах разгрузки гидротермальных систем с целью изучения приповерхностной толщи отложений (приложение 7, 8).

5. На основе применения георадарных исследований впервые в условиях Камчатки показано, что в естественном залегании грунты обладают контрастными электрофизическими свойствами, позволяющими уверенно расчленять разрез грунтов по их литологическим свойствам и обводненности.

6. Метод георадиолокации применим для геологического картирования при исследовании вулканических областей и выделения георадарных фаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе применения георадарных исследований впервые в условиях Камчатки показано, что в естественном залегании грунты обладают контрастными электрофизическими свойствами, позволяющими уверенно расчленять разрез грунтов по их литологическим свойствам и степени обводненности. Эти данные повышают достоверность изучения инженерно-геологических (грунтовых) условий Камчатки, что важно для обеспечения безопасности при дальнейшем проектировании инфраструктуры в районах с высокой сейсмической активностью.

2. Впервые выделены георадарные фации в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов. Это затрагивает актуальные вопросы о генезисе вулканических отложений в этом районе, что помогает в выяснении характера вулканической деятельности исследуемой области.

3. Впервые на основе комплексного анализа данных георадиолокации получена детальная информация о гидрогеологической обстановке районов исследований некоторых гидротермальных систем. Применяемый метод и анализ данных может быть использован для других районов с подобным геологическим строением.

Работа выполнена в рамках реализации Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030. Дальний Восток» и при финансовой поддержке научно-исследовательского гранта на тему «Уточнение грунтовых условий и геологического строения территории города Петропавловск-Камчатский с помощью метода георадиолокации».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абкадыров И.Ф., Букатов Ю.Ю. Первый опыт применения георада-ра «ОКО» на Камчатке // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2004. № 4. С. 125-129.
2. Аверьев В.В. Условия разгрузки Паужетских гидротерм на юге Камчатки. Тр. Лабор. Вулканол. Ан СССР. 1961. Выпуск 19. С. 80-98.
3. Аверьев В.В. Гидротермальный процесс в вулканических областях и его связь с магматической деятельностью. Современный вулканизм. М.: Наука, 1966. С. 118-128.
4. Аверьев В.В., Белоусов В.И., Карпов Г.А. и др. Паужетские горячие воды на Камчатке / Ред. Б.И. Пийп. М.: Наука, 1965. 208 с.
5. Апрельков С.Е. Тектоника и история вулканизма Южной Камчатки // Геотектоника. 1971. № 2. С. 105-111.
6. Апрельков С.Е., Бондаренко В.Н. Новые данные по геологии Юго-Восточной Камчатки // Современная геология. 1963. № 3. С. 74-88.
7. Апрельков С.Е., Бондаренко В.Н., Власов Г.М. Центральная Камчатка. Стратиграфия // Геология СССР. 1964. Т. 31. С. 154-177.
8. Апрельков С.Е., Шеймович В.С. Древний вулкан Юго-Восточной Камчатки с современными гидротермальными проявлениями // Бюлл. вулканол. станций. 1964. № 36. С. 48-60.
9. Атлас Сахалинской области / под ред. Г.В. Комсомольского, И.М. Сирька. М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1967. 135 с.
10. Бабадаглы В.А., Изотова Т.С., Карпенко И.В. и др. Литологическая интерпретация геофизических материалов при поисках нефти и газа. М.: Недра, 1988. 256 с.
11. Баранников А.Г. Особенности методики поисков и разведки ведущих геолого-промышленных типов месторождений полезных ископаемых // Поиски и разведка ведущих геолого-промышленных типов месторождений полезных ископаемых: учебное пособие. Екатеринбург, 2011. С. 19-177.
12. Белоусов В.И., Белоусова С.П. Природные катастрофы и экологические риски (на примере геотермальной энергетики): учебно-методическое пособие. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2002. 160 с.
13. Белоусов В.И. О роли геологических факторов в процессе становления и деятельности гидротермальных систем в областях современного вулканизма // Вулканизм и геохимия его продуктов М.: Наука, 1967. С. 42-50.
14. Белоусов В.И. К вопросу об образовании спекшихся туфов, расположенных в пределах гидротермальных систем // Вулканизм и глубины Земли. М.: Наука, 1971. С. 270-276.

15. Белоусов В.И. Геология геотермальных полей в областях современного вулканизма. М.: Наука, 1978. 174 с.

16. Белоусов В.И., Сугробов В.М. Геологическая и гидрогеологическая обстановка геотермальных районов и гидротермальных районов и гидротермальных систем // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 5-22.

17. Бинюков Е.А., Едемский Д.Е. и др. Применение георадиолокации при обследовании фортификационных сооружений // Известия РГО. 2019. Т. 151. Вып. 2. С. 64-77.

18. Боярская И.Д., Сирица Д.В. Оценка воспроизводимости результатов измерений содержаний газов в подземных водах // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды Второй региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 11-17 октября 2009 г. / Отв. ред. В.Н. Чебров. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 345-347.

19. Блукке П.П., Асаулова Н.П., Остапенко С.В. Отчет о результатах предварительной разведки на участке Дачном Мутновского месторождения парогидротерм с подсчетом запасов теплоносителя для обоснования проекта строительства первой очереди геотермальной электростанции мощностью 50 МВт. ПГО "Сахалингеология". 8 книг. 1987. Приложение № 37,40, 42, 45, 57. (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН).

20. Вакин Е.А., Кирсанов И.Т., Кирсанова Т.П. Термальные поля и горячие источники Мутновского вулканического района // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: Дальневост. кн. изд., 1976. С. 85-114.

21. Вакин Е.А., Пилипенко Г.Ф. Мутновский геотермальный район на Камчатке // Изучение и использование геотермальных ресурсов в вулканических областях. М., 1979. С. 36-46.

22. Вакин Е.А., Леонов В.Л., Овсянников А.А. Мутновский геотермальный район // Активные вулканы и гидротермальные системы Камчатки. Путеводитель науч. экскурсий. Петропавловск-Камчатский, 1985. С. 164-198.

23. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М.: МГУ, 2004. 153 с.

24. Власов Г.М. Основные черты геологического строения территории и ее районирование // Геология СССР. М.: Наука, 1964. Т. 31. С. 54-64.

25. Воробьев А.А., Ширяева В.Ф. и др. О природе электромагнитных волн, излучаемых горными породами при их нагружении // Проблемы нефти и газа Тюмени. 1974. Вып. 24. С. 77-80.

26. Воробьев А.А. и др. Поиск эффектов, обусловленных существованием в литосфере локальных электрических полей // Сейсмология Узбекистана. Ташкент: Фан., 1975. С. 213-221.

27. Вопросы подповерхностной радиолокации. М.: Радиотехника, 2005.

28. Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике: Справочник геофизика / под ред. В.М. Дмитриева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1990. 498 с.
29. Геологический словарь. М.: Недра, 1973. Т. 1. 486 с.
30. Геологическая карта острова Сахалин. Масштаб 1:1000000 // под ред. В.Н. Верещагина. Л.: ВСЕГЕИ, 1969.
31. Горбачев Ю.И. Геофизические исследования скважин: учебник для вузов / под ред. Е.В. Каруса. М.: Недра, 1990. 398 с.
32. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмoeлектромагнитные явления. М.: Наука, 1988. 174 с.
33. Гриб Е.Н., Леонов В.Л. Кальдера Карымская: строение и состав пирокластических потоков // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1. Вып. 17. С. 61-76.
34. Гриб Е.Н., Леонов В.Л., Флоренский И.В., Храмов Н.А. Геологические условия термопроявлений бассейна р. Жировой // Юго-восточная Камчатка // Бюлл. вулканол. станций. 1976. № 52. С. 85-92.
35. Гусев А.А., Матвиенко Ю.Д., Кожемяка Н.Н. Отчет по теме: "Оценка сейсмической опасности площадок строительства Мутновской ГеоТЭС". Петропавловск-Камчатский, 1984. 177 с.
36. Девис Дж. Статистика и анализ геологических данных. М.: Мир, 1977. 572 с.
37. Делемень И.Ф. Заключение об оползневой опасности склонов на участке размещения очистных сооружений на мысе «Чавыча» // Институт вулканологии ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский, 1998. 20 с.
38. Делемень И.Ф., Павлова В.Ю., Константинова Т.Г. Уточнение инженерно-геологических условий краеведческого музея в г. Петропавловске-Камчатском на ул. Ленинская, 20. Отчет. Петропавловск-Камчатский, 2012. 25 с. Архив ООО НИЦ «Геоконсалтинг».
39. Делемень И.Ф., Константинова Т.Г., Акбашев Р.Р., Бубнов А.Б., Берсенёва Н.Ю., Лунгул О.М., Павлова В.Ю., Рылов Е.С. Уточнение сейсмических условий и оползневой опасности на объекте «Реконструкция канализационных очистных сооружений «Чавыча»». Отчет. Петропавловск-Камчатский, 2012. 117 с. Архив ООО НИЦ «Геоконсалтинг».
40. Дмитриев В.И. Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике. Справочник геофизика. М.: Недра, 1990. 498 с.
41. Долгаль А.С. Комплексирование геофизических методов: учеб. пособие. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2012. 167 с.
42. Дьяконов Д.И., Леонтьев Е.И., Кузнецов Г.С. Общий курс геофизических исследований скважин. М.: Недра, 1984. 432 с.
43. Жарков Р.В. Особенности геохимии термальных вод Дагинского месторождения (о. Сахалин) // Строение литосферы и геодинамика. Доклады XXI Всероссийской молодежной конференции. Иркутск, 2005. С. 140-141.

44. Жарков Р.В. Дагинское месторождение термоминеральных вод на севере о. Сахалин // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: сборник материалов II Сахалинской молодежной научной школы, Южно-Сахалинск, 4-10 июня 2007 г. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2008. С. 285-290.

45. Иванов В.В. Курортные ресурсы Сахалина и перспективы их лечебного использования: отчет комплексного отряда Сахалинской экспедиции. М.: Центральный институт курортологии, 1954. 265 с.

46. Инструкция по сейсморазведке. М., 1986.

47. Килькиев Р.Ш., Куксенко В.С. Электрические эффекты и зарождение трещин в щелочно-галоидных кристаллах // Физика твердого тела. 1980. Т. 22, № 10. С. 3133-3138.

48. Кирсанов И.Т., Озеров Ю.А. Состав продуктов и энергетический эффект извержения вулкана Горелый в 1980-1981 гг. // Вулканология и сейсмология. 1983. № 1. С. 25-43.

49. Кирсанов И.Т. Вулкан Горелый, его геологическое строение, последние извержения и состав продуктов // Вулканизм и связанные с ним процессы. 1985. Вып. 1. С. 32.

50. Кирюхин А.В., Делемень И.Ф., Гусев Д.Н. Высокотемпературные гидротермальные резервуары. М.: Недра, 1991. 160 с.

51. Кирюхин А.В., Кирюхин В.А., Манухин Ю.Ф. Гидрогеология вулканогенов. СПб.: Наука. 2010. 395 с.

52. Кожурин А.И., Пономарева В.В., Пинегина Т.К. Активная разломная тектоника юга Центральной Камчатки // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2008. № 2 (12). С. 10-27.

53. Комиссаренко Б.Т. Минеральные источники и лечебные грязи Сахалина и Курил. Южно-Сахалинск: Сахалин. кн. изд-во, 1964. 115 с.

54. Комплексирование методов разведочной геофизики: Справочник геофизика / под. ред. В.В. Бродового, А.А. Никитина. М.: Недра, 1984. 384 с.

55. Коновалова О.А. ГИС-проект «Повреждаемость зданий и сооружений в г. Петропавловске-Камчатском при семибалльном землетрясении 1971 года» // Природная среда Камчатки: Материалы IX региональной молодежной научной конференции. 12-13 апреля 2010 г. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2010. С. 61-70.

56. Кононов В.И. Геохимия термальных вод областей современного вулканизма (рифтовых зон и островных дуг). М.: Наука, 1983. 216 с.

57. Константинова Т.Г. Поведение грунтов и зданий при сильных землетрясениях: монография. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. 188 с.

58. Косков В.Н., Косков Б.В. Геофизические исследования скважин и интерпретация данных ГИС: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. 317 с.

59. Константинова Т.Г., Шарапов В.Г. О принципах построения карты сейсмического микрорайонирования территории г. Петропавловска-Камчатского. М.: Наука, 1977. С. 232-236.

60. Кузьмин Ю.Д., Рябинин Г.В. Мониторинг газового состава и гидрохимических параметров гидротермально-магматических систем // Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма: материалы Международного полевого Курило-Камчатского семинара, 16 июля – 6 августа / Гл. ред. д.г.-м.н. С.Н. Рычагов. Петропавловск-Камчатский: ОТТИСК, 2005. С. 328-342.

61. Кузьмин Ю.Д., Полетаев В.А. Опыт определения «чувствительных зон» земной коры при гидрогеохимических исследованиях на Камчатке // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Материалы шестой научно-технической конференции, 1-7 октября 2017 г. Петропавловск-Камчатский, 2017. URL: <http://emsd.ru/conf2017lib/pdf/predv/kuzmin.pdf>.

62. Кузнецов В. «Спасатель по имени КОС» // Камчатское время. URL: http://kamtime.ru/old/archive/03_08_2005/16.shtml.

63. Курчиков А.Р., Плавник А.Г., Курчиков Д.А., Ицкович М.В., Галкина Н.Ю. Особенности фильтрационно-емкостных свойств коллекторов Урненского и Усть-Тегусского месторождений // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2012. № 9. С. 11-19.

64. Леонов В.Л., Rogozin A.H. Карымшина – гигантская кальдера – супервулкан на Камчатке: границы, строение, объем пирокластики // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 14-28.

65. Леонов В.Л. Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1989. 104 с.

66. Леонов В.Л., Гриб Е.Н. Леонов В.Л., Гриб Е.Н. Структурные позиции и вулканизм четвертичных кальдер Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2004. 189 с.

67. Лодис Ф.А., Семенов В.И. Краткая история освоения источников Камчатки // Камчатка – край лечебный. П.-К.: Дальневосточное книжное издательство, Камчатское отделение, 1993. 150 с.

68. Лоншаков Е.А. Ряды вулcano-тектонических структур и структурно-вещественные парагенезисы Южной Камчатки // Бюлл. вулканол. станций. 1979. № 57. С. 79-92.

69. Лунина О.В., Гладков А.С., Афонькин А.М., Серебряков Е.В. Стиль деформаций в зоне динамического влияния Мондинского разлома по данным георадиолокации (Тункинская впадина, юг Восточной Сибири) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 9. С. 1616-1633.

70. Мельникова А.В., Шульженкова В.Н., Берсенева Н.Ю., Рылов Е.С. Комплексные геофизические исследования в районе скважины ГК-5 (Карымшинская геотермальная система) // Исследования в области наук

о Земле: Материалы IX региональной молодежной научной конференции. 1-2 декабря 2011 г. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2011. С. 185-200.

71. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В. Динамика активности вулканов Мутновский и Горелый в голоцене и вулканическая опасность для прилегающих районов // Вулканология и сейсмология. 1987. № 3. С. 3-18.

72. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д. Возраст и динамика формирования действующих вулканов Курило-Камчатской области // Известия АН СССР. Серия: геология. 1990. № 4. С. 17-31.

73. Мелекесцев И.В. Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 201 с.

74. Отчет по макросейсмическому обследованию последствий землетрясения 25 (24) ноября 1971 года на территории г. Петропавловска-Камчатского. Альбом I. Пояснительная записка. Петропавловск-Камчатский, 1974.

75. Отчет об инженерно-геологических изысканиях. Уточнение карты СМР для важных и критических объектов г. Петропавловска-Камчатского. Том II. Участок 2. Здание областной администрации. Архив ОАО "КамчатГИСИЗ" №1120 ДСП. 1999.

76. Отчет об инженерно-геологических изысканиях. Уточнение карты СМР для важных и критических объектов г. Петропавловска-Камчатского. Том IV. Отчет ИВ РАН по теме "Оценка тектонических условий, сейсмических свойств грунтов и опасных геологических процессов на участках уточнения карты СМР для важных и критических объектов г. Петропавловска-Камчатского: комплекса зданий областной больницы, здания областной администрации, комплекса зданий и сооружений ТЭЦ-2". Архив ОАО "КамчатГИСИЗ" №1120 ДСП. 1999.

77. Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. М.: Наука, 1965. 164 с.

78. Перельгин В.Т., Машкин К.А., Коротченко А.Г., Гайнетдинов Р.Г., Романов В.М., Глухов В.Л., Сафонов П.А., Камалтдинов А.Ф., Огнев А.Н., Шабиев И.Х. Актуальные разработки ОАО НПП «ВНИИГИС» и ООО НПП «ИНГЕО»: аппаратура и комплексы для геофизических исследований скважин на месторождениях твердых полезных ископаемых и подземных вод // Каротажник. 2016. № 7 (265). С. 24-51.

79. Пийп Б.И. Термальные ключи Камчатки. М., 1937. 268 с.

80. Поляков А.Ю. Анализ условий водного и газового питания Мутновского геотермального резервуара (Камчатка): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Петропавловск-Камчатский, 2018. 116 с.

81. Пупатенко В.В., Сухобок Ю.А. Литологическое расчленение разреза по данным георадиолокации // Инженерная экология. 2013. № 3. С. 154-161.

82. Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «ОКО-2». Техническое описание. Инструкция по эксплуатации. Версия 2.5. Раменское: ООО «Логические системы», 2009. 92 с.
83. Разведочные работы на Дагинском месторождении термальных вод в Ногликском районе в 1990-1991 гг. / исполн.: И.Г. Завадский. Южно-Сахалинск: Сахалингеология, 1991. 218 с. Инв. №7078 (Росгеолфонд, Центральное фондохранилище).
84. Региональная гидрогеология Сибири и Дальнего Востока: сб. науч. тр. / отв. ред. П.Ф. Перлович. Иркутск, 1962. С. 224-228.
85. Рекомендации по проведению георадиолокационных измерений для решения геологических задач. Раменское: ООО «Логические системы», 2008. 28 с.
86. РСН 66-87. Технические требования к производству геофизических работ. Сейсморазведка. Госстрой РСФСР.
87. Рослый Г.А. Мутновский энергетический проект. Контракт №589/35806573/9-0011/00 “Бурение скважин и разработка месторождения”. Основные результаты эксплуатационного бурения. П.-К.: ОАО “Востокгеология” и ГП “Мутновка”, 2003. 36 с.
88. Рыбаков М.Б., Бурдэ А.И., Столпнер М.Н. Основные положения и проблемы комплексной интерпретации геофизических материалов // Геофизические методы при геолого-съёмочных работах масштаба 1:50 000 с общими поисками. Л.: НПО «Рудгеофизика», 1986. С. 16-26.
89. Рычагов С.Н., Жатнуев Н.С., Коробов А.Д. и др. Структура гидротермальной системы. М.: Наука, 1993. 298 с.
90. Савельев Д.П., Палечек Т.Н., Портнягин М.В. Кампанские оксанические кремнисто-вулканогенные отложения в фундаменте Восточного Камчатского вулканического пояса // Тихоокеанская геология. 2005. Т. 24, № 2. С. 46-54.
91. Селянгин О.Б., Пономарева В.В. Строение и развитие Гореловского вулканического центра, Южная Камчатка // Вулканология и сейсмология. 1999. № 2. С. 3-23.
92. Селянгин О.Б. К вулканам Мутновский и Горелый // Вулканологический и туристический путеводитель. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2009. 108 с.
93. Сводный отчет по сейсмическому микрорайонированию г. Петропавловска-Камчатского. Часть 1. Инструментальное сейсмическое микрорайонирование. Том 1. Текст и графические приложения. 1974.
94. Смирнов В.А. и др. Закономерности генерирования электромагнитного сигнала при механическом воздействии // Журнал технической физики. 1984. Т. 54, № 2. С. 336-341.
95. Современная изученность гидротермоминеральных ресурсов Сахалина и Курильских островов и перспективы их использования в народ-

ном хозяйстве: геол. отчет за 1990–1991 гг. / исполн.: Розорительева Т.С., Прядко В.Е., Спалито Е.Л. Южно-Сахалинск: Сахалингеология, 1991. 895 с. Инв. № 461852 (Росгеолфонд, Центральное фондохранилище).

96. Соколов К.О., Попков П.А., Прудецкий Н.Д. Возможности георадиолокации при исследовании разрывных нарушений на месторождениях полезных ископаемых криолитозоны // Горн. информ.-аналит. бюл. 2013. № 3. С. 351–355.

97. Соколов К.О., Прудецкий Н.Д. Опыт применения георадиолокации для исследования разрывных нарушений на россыпных месторождениях криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 30. С. 333–337.

98. СП 11-105-97. «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. «Правила производства геофизических исследований». М.: Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя России, 2004.

99. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. М.: Стандартинформ, 2018. 115 с.

100. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. М.: МГУ, 2008. С. 42–52.

101. Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., Марченко А.Л., Субетто Д.А., Рыбалко А.Е., Алешин М.И. Возможности георадиолокации при изучении четвертичных отложений в озерах Карелии // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2016. № 5. С. 62–75.

102. Страхов В.Н. Основные направления теории и методологии интерпретации геофизических данных на рубеже XXI столетия. I // Геофизика. 1995. № 3. С. 9–18.

103. Страхов В.Н. Основные направления теории и методологии интерпретации геофизических данных на рубеже XXI столетия. II // Геофизика. 1995. № 4. С. 10–20.

104. Сугробов В.М., Набоко С.И., Словцов И.Б. и др. Отчет по теме: Минералого-петрографическое описание скважин Мутновского месторождения парогидротерм. Петропавловск-Камчатский, 1988. 257 с. (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН).

105. Тарабанько А.В. Применение георадиолокации при изучении разрывных нарушений, связанных с коровыми землетрясениями в районе реки Поперечная (Южная Камчатка) // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. 2007. № 1 (9). С. 154–158.

106. Техническое описание. Инструкция по эксплуатации. Око-2. Раменское: ООО «Логические Системы», 2007. 93 с.

107. Федорова Л.Л., Куляндин Г.А. Методика георадиолокационной оценки влажности дисперсных горных пород // Наука и образование. АН Республика Саха (Якутия). 2017. № 4. С. 72–76.

108. Федорова М.П., Куляндин Г.А., Федорова Л.Л. Обследование дна озера Борулаах с поверхности ледяного покрова методом георадиолокации // Материалы XI Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения. 2017. С. 337-338.

109. Феофилактов С.О., Рычагов С.Н., Букатов Ю.Ю., Нуждаев И.А., Нуждаев А.А. Новые данные о строении разгрузки гидротерм в районе Восточно-Паужетского термального поля (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2017. Т. 11, № 5. С. 353-356.

110. Фищенко А.Н., Лебедев М.В., Мазниченко М.В., Соколовская О.А., Яневиц Р.Б. Новые данные о геологическом строении нефтегазоносного резервуара в верхней части Доюрского комплекса Северо-Варьганского месторождения // Нефтяное хозяйство. 2018. № 3. С. 13-17.

111. Хаин В.Е., Рябухин А.Г., Наймарк А.А. История и методология геологических наук. М.: Академия, 2008. 416 с.

112. Хатаишвили Н.Г. Об электромагнитном эффекте при трещинообразовании в щелочно-галоидных кристаллах и горных породах // Физика Земли. 1984. № 9. С. 13-19.

113. Хмелевской В.К., Горбачев Ю.И., Калинин А.В., Попов М.Г., Селиверстов Н.И., Шевнин В.А. Геофизические методы исследований // Учебное пособие для геологических специальностей вузов. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. 232 с.

114. Цитенко Н.Д. Воды Дагинских горячих ключей на о. Сахалине // Труды ВНИГРИ. 1961. Вып. 181. С. 203-213.

115. Шварцев С.Л., Пиннекер Е.В., Перельман А.И. и др. Основы гидрогеологии. Гидрогеохимия. Новосибирск: Наука, 1982. 282 с.

116. Щварцман Ю.Г., Игловский С.А., Горшков Д.П. Выявление гидрогеологических особенностей гидротермального урочища Пымвашор (гряда Чернышева) методом георадиолокации // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2013. Вып. 3 (15). С. 81-86.

117. Шварц Я.Б. и др. Отчет о проведении детальных поисковых геофизических работ на участке “Дачный”, поисковых геофизических работ на западных флангах Мутновского месторождения парогидротерм и работ по обобщению геофизических материалов по Мутновскому геотермальному району в 1987–1990 гг. П.-К.: ПГО “Камчатгеология”, 1990. Книга 1. 268 с. (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН).

118. Штейн М.А. Определение параметров и глубин залегания термальных подземных вод // Труды СахКНИИ. Южно-Сахалинск. 1962. Вып. 12. С. 162-165.

119. Штейн М.А. Термальные воды Сахалина и вопросы их использования // Региональная геотермия и распространение термальных вод в СССР. М.: Наука, 1967. С. 274-280.

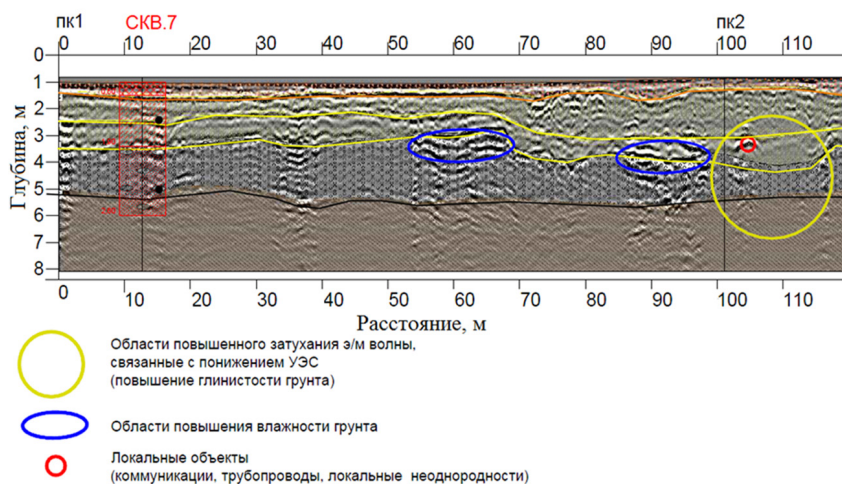
120. Ямпольский В. Петропавловский водоканал – будущее строится сегодня! // Камчатское время. URL: <http://kamtime.ru/node/1546>.
121. Baker P.L. Response of ground penetrating radar to bounding surfaces and lithofacies variations in sand barrier sequences // *Expl Geophys.* 1991. № 22. P. 19-22.
122. Batzle M.L., Simmons G. Microfractures in rocks from two geothermal areas // *Earth Plant. Sci. Lett.* 1976. № 30. P. 71-93.
123. Beloussov V.I. Geothermal structure of the hydrothermal systems of Kamtchatka // *Bull. volcanol.* 1967. Vol. XXX. P. 73-83.
124. Bodvarsson G. Physical characteristics of natural heat resources in Iceland // *Un. Nations Conf. New Sources Energy. Rome*, 1961. P. 1–19.
125. Facca G., Tonani F. The self-sealing geothermal field, *Bull. Volcano!* 1967. № 30. 271 p.
126. Randall W. An analysis of the subsurface structure and stratigraphy of the Salton Sea geothermal anomaly, Imperial Valley, California. Ph.D. Thesis, University of California, Riverside, Calif. (unpublished), 1974. URL: www.sciencedirect.ru.
127. Smith J., Durucan S., Korre A., Ji-Quan Shi. Carbon dioxide storage risk assessment: Analysis of caprock fracture network connectivity // *International Journal of Greenhouse Gas Control.* 2011. № 5. P. 226-240.
128. Cagnoli B., Russell J. K. Imaging the subsurface stratigraphy in the Ubehebe hydrovolcanic field (Death Valley, California) using ground penetrating radar // *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 2000. № 96. P. 45-56.
129. Ekes C., Hickin E.J. Ground penetrating radar facies of the paraglacial Cheekye Fan, southwestern British Columbia, Canada / *Sedimentary Geology.* 2001. № 143. P. 199-217.
130. Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Usacheva O.O., Kiryukhin P.A. Thermal-Permeability Structure and Recharge Conditions of the Mutnovsky High Temperature Geothermal Field (Kamchatka, Russia) // *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 2018. № 356C. P. 36-55.
131. Younker L.W., Kasameyer P.W., Tewhey J.D. Geological, geophysical and thermal characteristics of the Salton Sea geothermal field, California // *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 1981. June 18. P. 5-6.
132. Vakin E.A., Polak B.G., Sugrobov V.M., Erlich E.N., Beloussov V.I., Pilipenko G.F. Recent hydrothermal systems of Kamchatka. *Geothermics* CNR Pisa, Italy, 1971. P. 1116-1133.
133. Zen M.T. Geothermy and its future in Indonesia // *Proceedings ITB* 1973. Vol. 7, № 1. P. 30-32.




ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Фрагмент примера обработки георадиолокационного профиля полученного в Камчатском крае

(Павлова В.Ю., Акбашев Р.Р. и др., 2019 г.)¹⁴



-  Области повышенного затухания э/м волн, связанные с понижением УЭС (повышение глинистости грунта)
-  Области повышения влажности грунта
-  Локальные объекты (коммуникации, трубопроводы, локальные неоднородности)

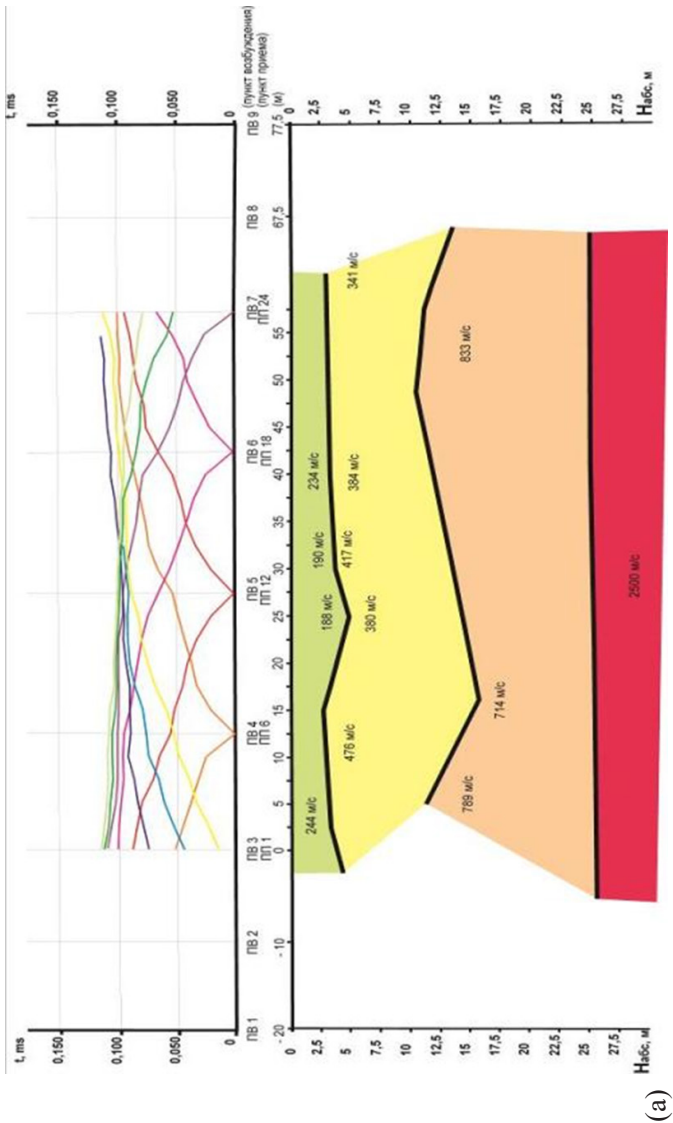
¹⁴ Павлова В.Ю., Акбашев Р.Р., Бубнов А.Б., Василюк И.Н. Опыт применения геофизических методов исследований для решения прикладных задач в сфере строительства (Камчатский край) // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Седьмой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2019 г. / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 94 – 99. URL: <http://www.emsd.ru/conf2019lib/pdf/mon/pavlova.pdf>

Приложение 2

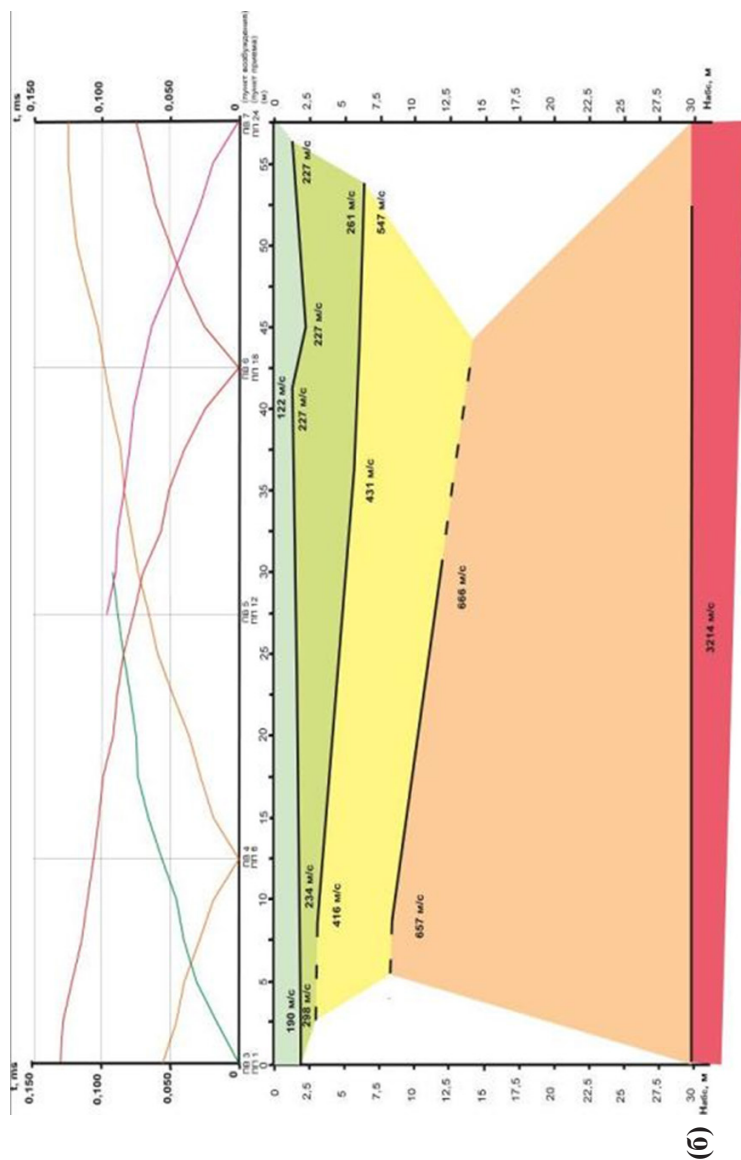
Долина реки Авача (Камчатка). Сейсморазведочные работы по методу КМПВ.

Система встречных и нагонящих годографов и сейсмический разрез по профилю №1 (а) и №2 (б).

Цифры в слое – скорости продольных волн в м/с. Составила: О.А. Лунгул



(а)



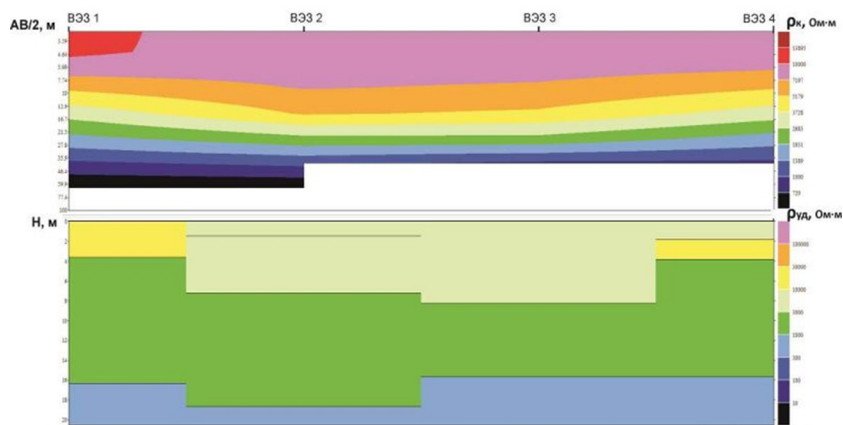
Приложение 3.

Долина реки Авача (Камчатка).
Результаты электроразведочных работ с использованием
метода вертикального электрического зондирования.
Профиль № 2. Составил: И.А. Федорченко.

На верхнем рисунке – График кажущегося электрического сопротивления (по горизонтали – расстояние в м).

На нижнем рисунке – График изменения удельного электрического сопротивления с глубиной.

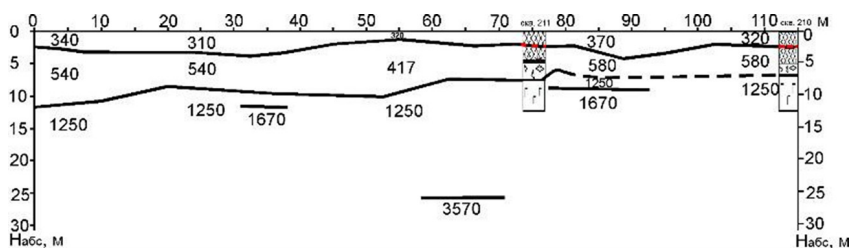
Желтый цвет – ≥ 10000 , светло-зеленый – ≥ 9000 ,
темно-зеленый – ≥ 1000 и синий – от 350 до 380 Ом·м.



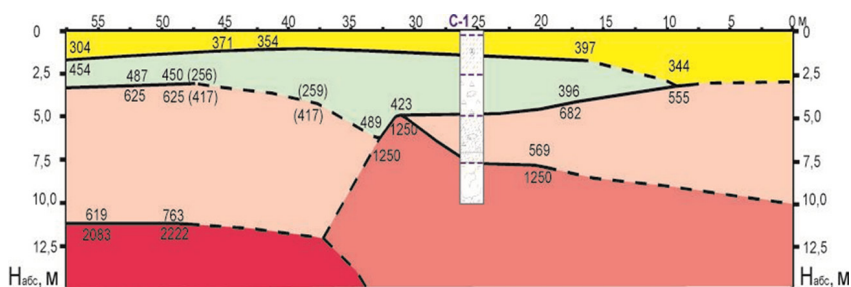
На геоэлектрическом разрезе в верхнем левом углу до глубины 4 м выделяется область с высоким значением удельного электрического сопротивления. На сейсмическом разрезе в этой области отмечено повышенное значение скорости продольных волн. Полученные данные свидетельствуют о том, что на данном участке профиля в слое встречаются обломки бетонной плиты.

Приложение 4

**Мыс Чавыча (г. Петропавловск-Камчатский).
Сейсморазведочные работы по методу КМПВ.
Сейсмогеологический разрез №1 (а) и №2 (б).
Вставка по центру – скважины. Цифры в слое – скорости
продольных – V_p (поперечных – V_s) волн в м/с.
Составила: О.А. Лунгул [39]**



(а)



(б)

Изменение диэлектрической проницаемости и скорости распространения электромагнитных волн для грунтов по исследуемым объектам в районе города Петропавловск-Камчатский

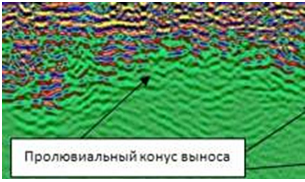
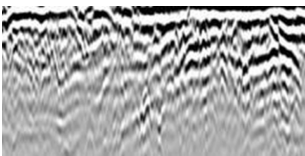
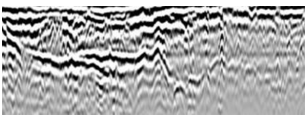
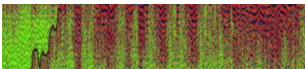
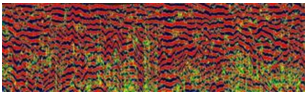

| № | Описание грунтов | Значение диэлектрической проницаемости (E) | Значение скорости распространения электромагнитной волны ($V_{\text{эмв}}$) | Примечание |
|---|--|--|---|---|
| 1 | Щебенистый грунт | 3.92 – 9 | 10 – 17.06 | Изменения показателей по степени водонасыщения (от меньшего к большему) |
| 2 | Щебенистый грунт с супесью до 40% | 17.06 | 7.27 | |
| 3 | Щебенистый грунт с песчаным заполнителем влажным 30-35% с включением глыб до 10% | 7.56 | 10.9 | |
| 4 | Крупнозернистые пески | 28 – 64 | 3.75 – 5.6 | Изменения показателей по степени водонасыщения (от меньшего к большему) |
| 5 | Ил черный текучий заторфованный | 9.86 – 16 | 7.5 – 9.54 | Изменения показателей по степени водонасыщения (от меньшего к большему) |
| 6 | Дресвяный грунт с песчаным заполнителем и разной степенью водонасыщения | 4.41 – 31.4 | 5.33 – 14 | Изменения показателей по степени водонасыщения (от меньшего к большему) |
| 7 | Супесь дресвяная с включением глыб до 5% | 8.01 | 10.6 | |
| 8 | Эловый выветрелых диабазов, разрушенный до щебенистого грунта | 7.84 | 10.71 | |

Приложение 6

Физико-механические свойства грунтов в районе города Петропавловск-Камчатский.
Архив ООО НИЦ «Геоконсалтинг»

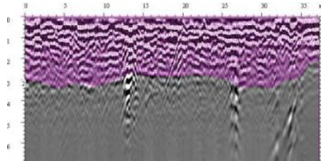
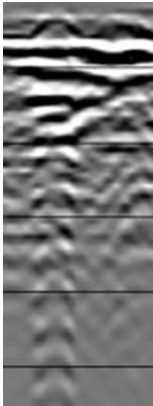
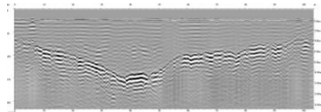
| Наименование грунта по ГОСТ 25100-2011 | Состояние песчаных грунтов, глинистых грунтов | Прядная влажность W, доли единиц | Плотность частиц грунта, г/см³ | Плотность грунта, г/см³ | | Коэффициент пористости, доли ед. | Удельное сцепление С, кПа (кгс/см²) | | Угол внутреннего трения, град. | | Модуль деформации E, МПа (кгс/см²) | Нормативная глубина сезонного промерзания (температурные данные по СП 131.13330.2012) | Грунта грунта по ТУСН-2001-01 |
|--|---|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------|----------------------------------|--|--------------------|--------------------------------|--------------------|------------------------------------|---|-------------------------------|
| | | | | Нормативное значение | Расчетное значение | | Нормативное значение | Расчетное значение | Нормативное значение | Расчетное значение | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Насыпной разнородный грунт по составу | Средней степени водонас. | - | - | 1.90 | - | - | R = 150 кПа | | | | | 1.94 | 29в, 6б |
| Торф, почвенно-растительный слой и сугсь макпористая | Средней степени водонас. | - | - | 1.21 | - | - | Использовать в качестве основания не рекомендуется | | | | | полное | 9а |
| Песок крупный | Средней степени водонас., насыщенный водой | 0.16 | 2.67 | 2.00 | 1.93 – 1.96 | 0.60 | 1 (0.01) | 1 (0.01) | 40 | 35 – 40 | 40 (400) | 1.94 | 29в |
| Песок средней крупности | Средней степени водонас., насыщенный водой | 0.19 | 2.68 | 1.95 | 1.94 – 1.95 | 0.65 | 1 (0.01) | 1 (0.01) | 36 | 32 – 36 | 30 (300) | 1.94 | 29в |
| Песок пылеватый | Средней степени водонас., насыщенный водой | 2.64 | 2.64 | 1.90 | 1.86 – 1.88 | 0.75 | 2 (0.02) | 2 (0.02) | 27 | 24 – 27 | 11 (110) | 1.80 | 29б |
| Щебенчатый грунт с сугсью | Средней степени водонас. | 0.20 | 2.74 | 2.14 | - | 0.55 | 1 (0.01) | 1 (0.01) | 35 | 30 – 35 | 30 (300) | 1.63 | 41а, 14 |

**Характеристика различных геологических структур
на волновой картине радарограмм полученных
на некоторых исследуемых объектах Камчатки**

| № | Геологическая структура | Вид волновой картины на радарограмме | Описание волновой картины на радарограмме |
|---|--|---|---|
| 1 | Пролувиальный конус выноса |  | Дифракция электромагнитных волн; гиперболическое расположение осей синфазности |
| 2 | Склон палеоручья |  | Наклонное и субгоризонтальное хаотическое расположение осей синфазности |
| 3 | Тело древнего оползня |  | Субгоризонтальное и хаотическое расположение пересекающихся осей синфазности, наличие дифракций |
| 4 | Отложения лавовых потоков андезибазальтов, базальтов и их элювия |  | Хаотическое расположение осей синфазности, затухание электромагнитных волн, выделение линз |
| 5 | Отложения аккумулятивных равнин |  | Горизонтальное расположение осей синфазности, последовательно залегающих друг на друга |
| 6 | Чашеобразные мульды |  | Горизонтальное расположение осей синфазности пересекает электромагнитная волна в виде «чаши» |

Приложение 8

**Характеристика различных геологических структур
на волновой картине радарограмм полученных в зоне
разгрузки некоторых исследуемых гидротермальных систем**

| № | Геологическая структура | Вид волновой картины на радарограмме | Описание волновой картины на радарограмме |
|---|-------------------------|---|--|
| 1 | Зоны трещиноватости |  | Проходящая волна |
| 2 | Зона дробления |  | Проходящая электро-магнитная волна, пересекающая горизонтально расположенные оси синфазности |
| 3 | Погребенные палеодолины |  | 1) Ярко выраженные оси синфазности георадиолокационного сигналов, что указывает на ненарушенные геологические слои отложений; 2) С низкими значениями амплитуд сигналов, что указывает на ослабленность горных пород вследствие дробления и трещиноватости. |

Научное издание

Павлова Вероника Юрьевна,
Делемень Иван Федорович

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА
ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ
НА КАМЧАТКЕ**

Монография



Технический редактор Доронкина Е.Н.

Подписано в печать 06.02.2024.

Бумага офсетная.

Гарнитура Times New Roman.

Формат 60×84 1/16.

Печать трафаретная. Печ. л. 9,0.

Тираж 500 экз. Заказ № 002-24.

Отпечатано в типографии ИД «Академия Естествознания»,
440026, г. Пенза, ул. Лермонтова, 3