

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-47-2-129-142>



Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 550.8.07, 550.8.08

Опыт работы с прибором георадар «Тритон-М» на территории города Петропавловск-Камчатский (Камчатка)

*В. Ю. Павлова**

ФГБОУ ВО «Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга»,
683032, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4, Россия

Аннотация. 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. Для оптимизации метода георадиолокации необходимо сопоставление и анализ результатов наблюдений в различных геологических условиях. Поскольку метод георадиолокации интенсивно развивается в последние годы, то теоретические исследования в области обработки данных необходимо иллюстрировать многочисленными примерами практического использования георадаров на разных объектах исследования. Цель исследований заключается в создании научно-методической основы метода георадиолокации применительно к Камчатке, включая методику обработки и интерпретации данных, с учетом практического опыта применения на различных объектах. В статье приводятся опыт и особенности работы с прибором георадар «Тритон-М» на территории города Петропавловск-Камчатский. Объектом исследований являются геологические особенности и грунтовые условия территории города Петропавловска-Камчатского, требующие уточнения и детального изучения. Охарактеризованы некоторые результаты георадиолокационного профилирования. Даны рекомендуемые значения параметров измерений при проведении работ. С практической точки зрения самыми важными параметрами георадара являются глубина зондирования (глубинность) и разрешающая способность по глубине. Прибор георадар «Тритон-М» применим для решения геологических задач на территории города Петропавловск-Камчатский, при этом оптимально подобранные значения параметров измерений минимизируют запись помех и дают более точную полезную информацию о зондируемой среде. Для точной интерпретации радарограмм необходимо использовать сведения о геологическом строении исследуемой территории.

Ключевые слова: Камчатка, город Петропавловск-Камчатский, георадар, метод георадиолокации, радарограммы, обработка данных

Получение: 28.06.2024; Исправление: 15.08.2024; Принятие: 19.08.2024; Публикация онлайн: 26.08.2024

Для цитирования. Павлова В. Ю. Опыт работы с прибором георадар «Тритон-М» на территории города Петропавловск-Камчатский (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2024. Т. 47. № 2. С. 129-142. EDN: OKEVKJ. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-47-2-129-142>.

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030. Дальний Восток» и в рамках реализации гранта ФГБОУ ВО «КамГУ им. Витуса Беринга» №124020800006-9 на тему научного проекта «Уточнение грунтовых условий и геологического строения территории города Петропавловск-Камчатский с помощью метода георадиолокации» (руководитель Павлова В. Ю.).

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Автор участвовал в написании статьи и полностью несет ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

*Корреспонденция:  E-mail: verpavlova88@gmail.com

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License



© Павлова В. Ю., 2024

© ИКИР ДВО РАН, 2024 (оригинал-макет, дизайн, составление)



Experience with the «Triton-M» georadar device in the Petropavlovsk-Kamchatsky city (Kamchatka)

V. Yu. Pavlova*

Vitus Bering Kamchatka State University, 683032, Petropavlovsk-Kamchatsky, st. Pogranichnaya, 4, Russia

Abstract. Determining the possibilities of using the ground penetrating radar method, which is a method of shallow geophysics, in seismically active areas will increase the information content and reliability of the results, especially in engineering and geological surveys to ensure seismic-resistant construction in geodynamically active areas, which include Kamchatka. To optimize the ground penetrating radar method, it is necessary to compare and analyze the results of observations in various geological conditions. Since the ground penetrating radar method has been intensively developing in recent years, theoretical research in the field of data processing must be illustrated by numerous examples of the practical use of ground penetrating radars at various research sites. The purpose of the research is to create a scientific and methodological basis for the georadar method in relation to Kamchatka, including methods for processing and interpreting data, taking into account practical experience of application at various sites. The object of the research is the geological features and soil conditions of the territory of the Petropavlovsk-Kamchatsky city, requiring clarification and detailed study. The article describes the experience and features of working with the «Triton-M» georadar device in the Petropavlovsk-Kamchatsky city. Some results of ground penetrating radar profiling are characterized. Recommended values of measurement parameters during work are given. From a practical point of view, the most important parameters of the ground penetrating radar are the probing depth and the depth resolution. The «Triton-M» ground penetrating radar device is applicable for solving geological problems in the territory of the Petropavlovsk-Kamchatsky city, while optimally selected values of measurement parameters minimize the recording of interference and provide more accurate useful information about the probed environment. For accurate interpretation of radargrams, it is necessary to use information about the geological structure of the studied territory.

Key words: Kamchatka, the Petropavlovsk-Kamchatsky city, georadar, the GPR method, radargrams, data processing.

Received: 28.06.2024; Revised: 15.08.2024; Accepted: 19.08.2024; First online: 26.08.2024

For citation. Pavlova V. Yu. Experience with the «Triton-M» georadar device in the Petropavlovsk-Kamchatsky city (Kamchatka). *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2024, 47: 2, 129-142. EDN: OKEVKJ. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-47-2-129-142>.

Funding. The work was carried out as part of the realization of the Strategic Academic Leadership Program «Priority 2030. The Far East» and as part of the implementation of the grant of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «KamSU. Vitus Bering» №124020800006-9 on the topic of the scientific project «Clarification of soil conditions and the geological structure of the territory of Petropavlovsk-Kamchatsky using the method of geolocation» (head Pavlova V. Yu.).

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. The author participated in the writing of the article and is fully responsible for submitting the final version of the article to the press.

*Correspondence:  E-mail: verpavlova88@gmail.com

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Pavlova V. Yu., 2024

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2024 (original layout, design, compilation)



Введение

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 [1].

Задачи исследования:

1. Оценка применимости и последующая адаптация метода георадиолокации для изучения грунтовых условий в сейсмоактивном регионе.
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 и грунтовые условия территории города Петропавловска-Камчатского (рис. 1, 2), требующие уточнения и детального изучения [2–4].

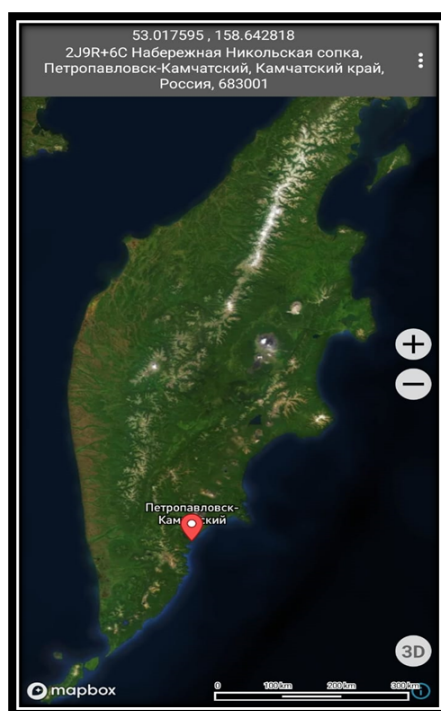


Рис. 1. Объект исследования на карте (Россия, Камчатка, город Петропавловск-Камчатский)

[Figure 1. The object of study on the map (Russia, Kamchatka, the Petropavlovsk-Kamchatsky city)]

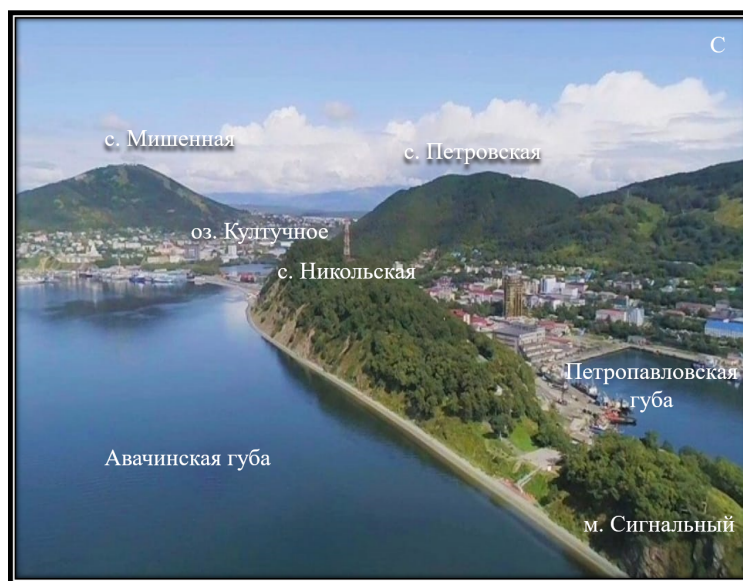


Рис. 2. Объекты исследования на территории города Петропавловск-Камчатский: сопка Никольская, Култучное озеро, сопка Мишенная (Россия, Камчатка)
 [Figure 2. Object of study in the territory of the city of Petropavlovsk-Kamchatsky city: Mount Nikolskaya, Lake Kultuchnoe, Mount Mishennaya (Russia, Kamchatka)]

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. В каждой из выделенных областей были выделены благоприятные, условно благоприятные, условно неблагоприятные и неблагоприятные районы для строительства. 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. Разжижение грунтов при сильных землетрясениях в г. Петропавловске-Камчатском происходит, в основном, в зоне с сейсмической опасностью X баллов. 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 г/см³) с глубиной залегания УГВ 10% обеспеченности менее 3 м; б) менее плотные дресвяные, супесчаные и песчаные грунты (объемный вес менее 2.0 г/см³) 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 (оползни, обвалы, лавины) также отнесены к Х-балльной зоне [5].

Для оптимизации метода георадиолокации необходимо сопоставление и анализ результатов геофизических наблюдений в различных геологических условиях. Полуостров Камчатка – часть активной Курило-Камчатской островодужной системы, протягивающейся на 2000 км от Японии на юге, до сочленения с Алеутской дугой на севере. Современное единство этой системы проявляется в непрерывном глубоководном желобе, сейсмофокальной зоне и поясе активного вулканизма. [6]. Малко-Петропавловская зона (МПЗ), расположенная на юго-восточном побережье полуострова Камчатка, простирается в северо-западном направлении от Авачинского залива до реки Быстрая (Малкинская). Она ограничена региональными разрывными нарушениями – Петропавловским и Вилучинским разломами северо-западного простирания – и субмеридиональным разломом, ориентированным вдоль реки Быстрая [7]. Формирование МПЗ связано с историей развития Тихоокеанской плиты и северо-западного обрамления Пацифики и, в частности, с аккрецией Кроноцкой палеодуги к континентальной окраине Камчатки [8–10]. Необходимость исследования проявляется в изучении грунтовых условий строительных площадок для обеспечения безопасности при дальнейшем проектировании инфраструктуры в районах с высокой сейсмической активностью и разнообразным сложным геологическим строением.

Актуальность исследований заключается в следующем [11]:

1. Для оптимизации метода георадиолокации необходимо сопоставление и анализ результатов наблюдений в различных геологических условиях.
2. Поскольку метод георадиолокации интенсивно развивается в последние годы, то теоретические исследования в области обработки данных необходимо иллюстрировать многочисленными примерами практического использования георадаров на разных объектах исследования.

Цель исследований заключается в создании научно-методической основы метода георадиолокации применительно к Камчатке, включая методику обработки и интерпретации данных, с учетом практического опыта применения на различных объектах.

Конструкция и принцип действия георадара «Тритон-М»

Для проведения исследований используем прибор георадар «Тритон-М» (рис. 3).

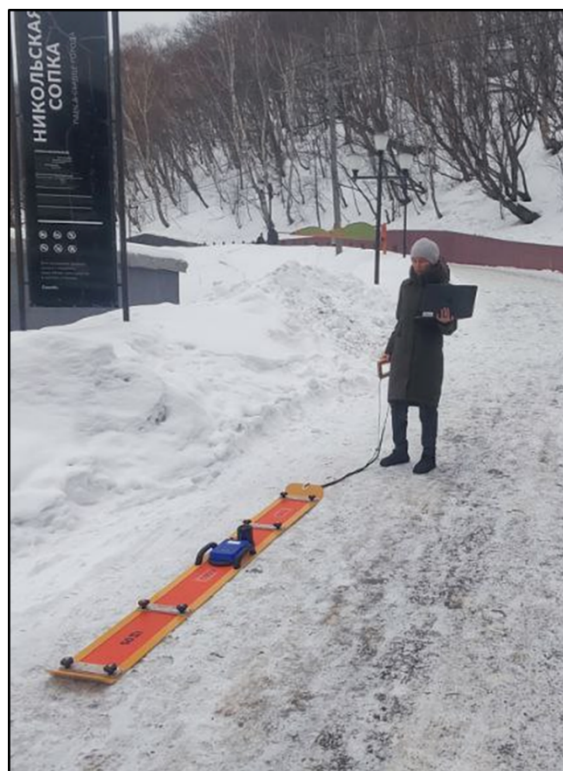


Рис. 3. Оператор с георадаром «Тритон-М»
[Figure 3. Operator with the «Triton-M» georadar]

Глубинный георадар «Тритон-М» оснащен одной приемно-передающей антенной. Длина георадара составляет 2 м, частота 100 и 50 МГц. Этот георадар позволяет получать отражения от границ с залеганием до 50 метров. Управление георадаром осуществляется в режиме реального времени. Прием данных зондирования производится на ноутбук по сети Wi-Fi.

Георадар «Тритон-М» представляет собой портативный радиолокатор, который, в отличие от классического, направляет зондирующие электромагнитные импульсы в исследуемую среду, а не в свободное пространство. Исследуемой средой может быть земля (отсюда наиболее распространенное название - георадар), вода, стены зданий и т.п.

Передающая антенна изделия излучает электромагнитные импульсы, которые для получения высокой разрешающей способности имеют очень малую длительность (единицы наносекунд) и достаточно широкий спектр излучения.

Выбор длительности импульса является компромиссом между необходимой глубиной зондирования и разрешающей способностью прибора – чем короче импульс, тем выше разрешающая способность, но меньше глубина зондирования.

Излученный передающей антенной в исследуемую среду электромагнитный импульс отражается от находящихся в ней предметов или любых неоднородностей, имеющих отличную от среды диэлектрическую проницаемость или проводимость. Такими неоднородностями могут быть локальные объекты, пустоты, границы раздела слоев различных пород, участки с различной влажностью и т.д.

В итоге на вход приемной антенны поступает сигнал, представляющий собой комбинацию сигнала, излученного передающей антенной и попавшего непосредственно в приемную антенну (сигнал прямого прохождения или прямая волна), и сигналов, отраженных от различных неоднородностей исследуемой среды (отраженная волна). Этот результирующий сигнал называется трассой. Очевидно, что любые подповерхностные неоднородности дадут отклик в волновой структуре принимаемого сигнала. Отраженный сигнал принимается приемной антенной, преобразуется в цифровой вид и запоминается для дальнейшей обработки [12–14].

Особенности работы с прибором «Тритон-М»

При работе георадара «Тритон-М» по поверхности исследуемой среды на экран монитора выводится совокупность трасс (радарограмма, или профиль), по которому можно определить местонахождение, глубину залегания и протяженность объектов (рис. 4).

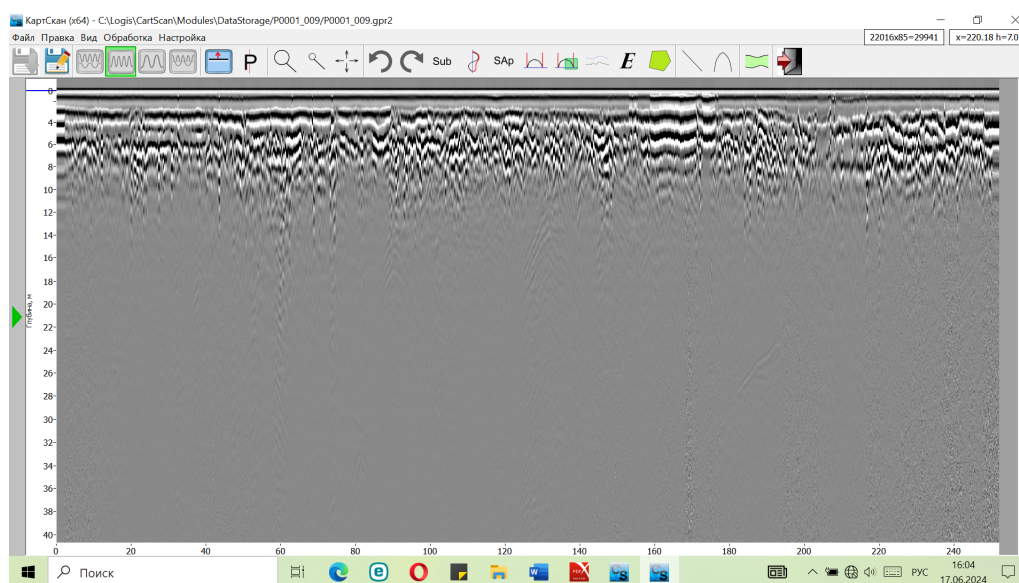


Рис. 4. Пример радарограммы в программе (георадар «Тритон-М». Город Петропавловск- Камчатский)

[Figure 4. For example – radargram in the CartScan program (georadar «Triton-M». The Petropavlovsk- Kamchatsky)]

Из-за широкой диаграммы направленности георадара локальные объекты наблюдаются не только в точке непосредственно под ним, но также на некотором удалении в обе стороны. При этом расстояние до объекта описывается характерной гиперболой, образуя так называемую дифрагированную волну. Объект, от которого возникла дифрагированная волна, находится в точке, соответствующей вершине гиперболы (рис. 5 и 6).

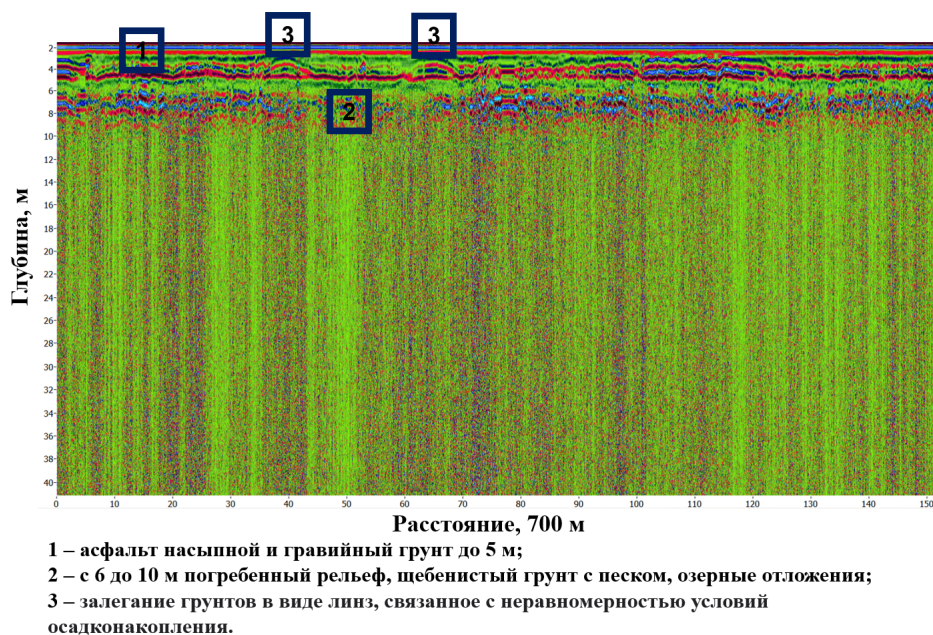


Рис. 5. Радарограмма 1, полученная в прибрежной зоне Култучного озера (город Петропавловск- Камчатский)
[Figure 5. Radarogram 1 (Kultuchnoye Lake, the Petropavlovsk- Kamchatsky city)]

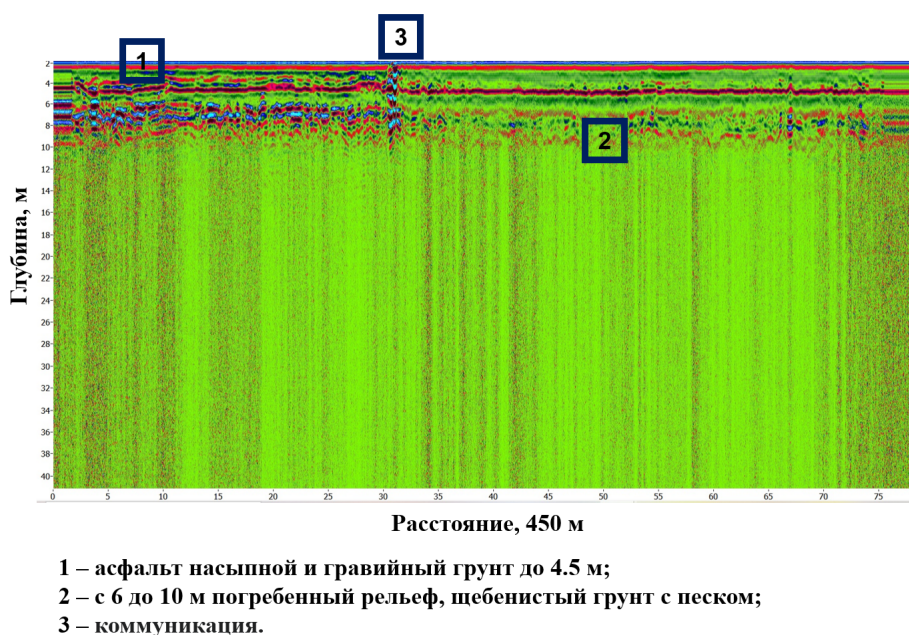


Рис. 6. Радарограмма 2, полученная в прибрежной зоне Култучного озера (город Петропавловск- Камчатский)
[Figure 6. Radarogram 2 (Kultuchnoye Lake, the Petropavlovsk- Kamchatsky city)]

С практической точки зрения самыми важными параметрами георадара являются глубина зондирования (глубинность) и разрешающая способность по глубине.

Разрешающая способность по глубине – это минимальное расстояние по вертикали между двумя объектами, при котором возможно раздельное наблюдение этих объектов. Разрешающая способность зависит от длительности зондирующего импульса – чем меньше длительность импульса, тем выше разрешающая способность.

Рекомендации по оптимизации проведения работ при использовании георадара «Тритон-М»

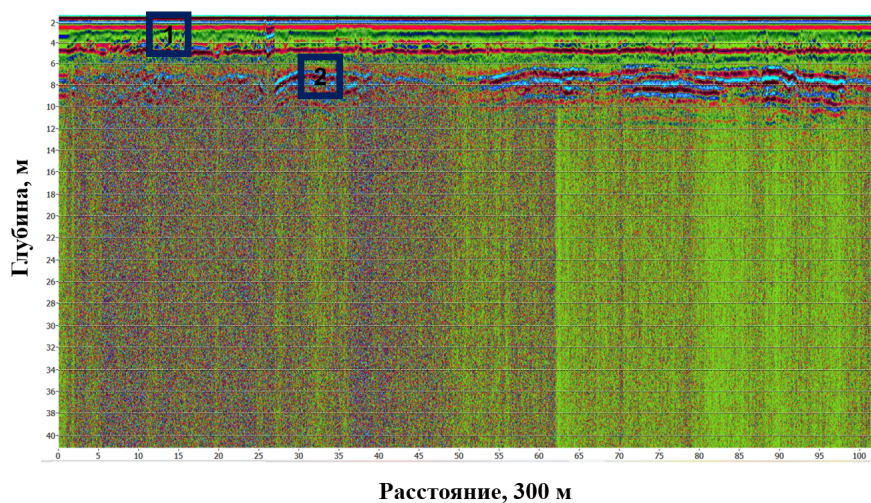
Перед началом измерительных работ рекомендуется провести пробную запись радарограммы на выбранной территории, с целью идентификации помех (в частности, уровня записи воздушных волн) и определения выбора параметров измерений.

Глубина зондирования георадара «Тритон-М» зависит как от технических характеристик георадара (излучаемой мощности, чувствительности и т.д.), так и от электрических свойств исследуемой среды. При распространении электромагнитной волны в среде, отличной от вакуума, происходит растекание токов проводимости в объеме среды, приводящее к затуханию электромагнитной волны. Поэтому важнейшей характеристикой, влияющей на глубину зондирования, является удельное затухание в среде. Соответственно, чем больше удельное затухание в среде, тем меньше достижимая глубина зондирования.

Особенностью практически всех природных и искусственных сред является значительное увеличение удельного затухания с ростом частоты. Поэтому для увеличения глубинности стоит использовать как можно более низкие частоты. Но при уменьшении частоты ухудшается разрешающая способность георадара. Поэтому выбор центральной частоты георадара (100 МГц или 50 МГц) является компромиссом между требуемой разрешающей способностью (необходимо уменьшать длительность импульса, т.е. повышать частоту) и глубиной зондирования (необходимо понижать частоту). С учетом противоречия между глубиной зондирования и разрешающей способностью задание одного из этих параметров практически однозначно определяет центральную частоту спектра зондирующего сигнала.

Обнаружение локальных объектов на радарограммах, полученных при проведении зондирования возможно по наличию отраженных от них сигналов, как в реальном времени, так и в постобработке сохраненных файлов. Сигналы, отраженные от обнаруженных объектов, отрисовываются на радарограммах в зависимости от направления перемещения антенного блока относительно оси объекта при проведении зондирования. При движении антенного блока перпендикулярно оси объекта или под острым углом объект отображается как одиночная гипербола. При движении антенного блока вдоль оси объекта отрисовка

отраженных сигналов на экране монитора радара-обнаружителя происходит, как показано на рис. 7.



1 – асфальт, уплотненный насыпной грунт до 6 м;
2 – с 6 до 10 м погребенный рельеф, морские прибрежные отложения.

Рис. 7. Радарограмма 3, полученная в прибрежной зоне Култучного озера (город Петропавловск-Камчатский)
[Figure 7. Radarogram 3 (Kultuchnoye Lake, the Petropavlovsk- Kamchatsky city)]

Если перемещение антенного блока происходит вдоль оси протяженного объекта (труба, кабель), то велика вероятность того, что оператор может пропустить или не заметить объект [14, 15].

Некоторые рекомендуемые значения параметров измерений для проведения работ на территории города Петропавловск-Камчатский с помощью георадара «Тритон-М»:

- количество точек по глубине – 511 (максимальное качество на большие глубины, можно использовать 255, но только при оперативной поисковой работе);
- развертка по глубине – 100-200 нс (изменяется ступенчато, если в нижней части радарограммы отсутствует область шумов, можно увеличить значение);
- режим сканирования – “Непрерывно”;
- эpsilon – 7 (значение диэлектрической проницаемости “Сухо”-7, “Влажно”-20, “Вода”-80) - можно выбрать желаемое значение диэлектрической проницаемости из типовых стандартных значений, или задать произвольное значение, исходя из априорной информации зондируемой среды; более точно можно рассчитать по полученной радарограмме).

Заключение

Прибор георадар «Тритон-М» активно используется для решения геологических задач на территории города Петропавловск-Камчатский, при этом оптимально подобранные значения параметров измерений минимизируют запись помех и дают более точную полезную информацию о зондируемой среде. Для точной интерпретации радарограмм необходимо использовать сведения о геологическом строении исследуемой территории.

Аббревиатуры

СМР Сейсмическое микрорайонирование

УГВ Уровень грунтовых вод

Список литературы

1. СП 14.13330.2018. *Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81**. Москва: Стандартинформ, 2018. 115 с.
2. Шеймович В. С. *Государственная геологическая карта Российской Федерации 1:200000. Серия Южно-Камчатская. Листы N-57-XXI (Северные Коряки), N-57-XXVII (Петропавловск-Камчатский), N-57-XXXIII (Сопка Мутновская)*. Москва: Объясн. зап., 2000. 302 с.
3. Савельев Д. П., Палечек Т. Н., Портнягин М. В. Кампанские океанические кремнисто-вулканогенные отложения в фундаменте восточного камчатского вулканического пояса, *Тихоокеанская геология*, 2005. Т. 24, № 2, С. 46–54.
4. Bergal-Kuvikas O., Bindeman I., Chugaev A., Larionova Y., Perepelov A., Khubaeva O. Pleistocene-Holocene Monogenetic Volcanism at the Malko-Petropavlovsk Zone of Transverse Dislocations on Kamchatka: Geochemical Features and Genesis, *Pure and Applied Geophysics*, 2022. vol. 179, pp. 3989–4011 DOI: 10.1007/s00024-022-02956-7.
5. Константинова Т. Г. *Поведение грунтов и зданий при сильных землетрясениях*. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. 188 с.
6. Есин Е. И., Василевский А. Н., Бушенкова Н. А. Пространственные корреляции особенностей рельефа, гравитационного поля и аномалий скоростей сейсмических волн центральной зоны Камчатского региона, *Геология и геофизика*, 2024. Т. 65, № 2, С. 303–318.
7. Гонтовая Л. И., Попруженко С. В., Низкоус И. В., Апрельков С. Е. Верхняя мантия Камчатки: Глубинная модель и связь с тектоникой, *Тихоокеанская геология*, 2008. Т. 27, № 2, С. 80–91.
8. Селиверстов Н. И. *Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг*. Москва: Научный мир, 1998. 164 с.
9. Авдейко Г. П., Бергаль-Кувикас О. В. Геодинамические условия образования адакитов и Nb-обогащенных базальтов (NEAB) на Камчатке, *Вулканология и сейсмология*, 2015. № 5, С. 1–13.
10. Агibalов А. О., Бергаль-Кувикас О. В., Зайцев В. А., Макеев В. М., Сенцов А. А. Взаимосвязь морфометрических параметров рельефа, характеризующих трещиноватость верхней части литосферы, и проявлений вулканизма Малко-Петропавловской зоны, *Геофизические процессы и биосфера*, 2023. Т. 22, № 2, С. 122–133.
11. Павлова В. Ю., Делемень И. Ф. *Применение метода георадиолокации на Камчатке*. Москва: Издательский дом Академии Естествознания, 2020. 144 с.
12. Владов М. Л., Старовойтов А. В. *Введение в георадиолокацию*. Москва: издательство МГУ, 2004. 153 с.
13. Старовойтов А. В. *Интерпретация георадиолокационных данных*. Москва: издательство МГУ, 2008. 192 с.
14. Руководство по эксплуатации: *Комплект Тритон-М*. Раменское: ООО «Логические Системы», 2021. 13 с.

15. Программный комплекс CartScan: *Руководство оператора*. Москва: ООО «Логис», 2022. 94 с.

Информация об авторе



Павлова Вероника Юрьевна ✉ – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры биологии и наук о Земле факультета естественных и технических наук, ведущий научный сотрудник международной интегративной научно-исследовательской лаборатории экстремальных явлений Камчатки, ФГБОУ ВО «Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга», Петропавловск-Камчатский, Россия,  ORCID 0000-0003-4753-1928.

References

- [1] SP 14.13330.2018. Construction in seismic areas. Updated edition of SNiP II-7-81*. Moscow, Standartinform, 2018, 115 p. (In Russian)
- [2] Sheimovich V.S. State geological map of the Russian Federation 1:200000. South Kamchatka series. Sheets N-57-XXI (Northern Koryaks), N-57-XXVII (Petropavlovsk-Kamchatsky), N-57-XXXIII (Mount Mutnovskaya), 2000, 302 p. (In Russian)
- [3] Savelyev D. P., Palechek T. N., Portnyagin M. V. Campanian oceanic siliceous-volcanogenic deposits in the basement of the eastern Kamchatka volcanic belt, *Pacific Geology*, 2005, vol. 24, no. 2, pp. 46–54. (In Russian)
- [4] Bergal-Kuvikas O., Bindeman I., Chugaev A., Larionova Y., Perepelov A., Khubaeva O. Pleistocene-Holocene Monogenetic Volcanism at the Malko-Petropavlovsk Zone of Transverse Dislocations on Kamchatka: Geochemical Features and Genesis, *Pure and Applied Geophysics*, 2022, vol. 179, pp. 3989–4011. DOI: 10.1007/s00024-022-02956-7.
- [5] Konstantinova T. G. Behavior of soils and buildings during strong earthquakes. Obninsk, FRC EGS RAS, 2020, 188 p. (In Russian)
- [6] Esin E. I., Vasilevskiy A. N., Bushenkova N. A. Spatial correlations between the terrain features, gravitational field and seismic velocity anomalies in the central Kamchatka region. *Russian Geology and Geophysics*, 2024, vol. 65, no. 2, pp. 285-298 (In Russian)
- [7] Gontovaya L. I., Popruzhenko S. V., Nizkous I. V., Aprelkov S. E. Upper Kamchatka mantle: Depth model and relationship with tectonics, *Pacific Geology*, 2008, vol. 27, no 2, pp. 80–91. (In Russian)
- [8] Seliverstov N. I. Stroyeniye dna kamchatskikh vod i geodinamika zony sochleneniya Kurilo-Kamchatskoy i Aleutskoy ostrovnykh dug [Structure of the bottom of the Kamchatka waters and geodynamics of the articulation zone of the Kuril-Kamchatsky and Aleutian island arcs]. Moscow: Scientific World, 1998, 164 p. (In Russian)
- [9] Avdeyko G. P., Bergal-Kuvikas O. V. Geodynamic conditions of formation of adakites and Nb-enriched basalts (NEAB) in Kamchatka, *Volcanology and Seismology*, 2015, no 5, p. 1–13. (In Russian)
- [10] Agibalov A. O., Bergal-Kuvikas O. V., Zaitsev V. A., Makeev V. M., Sentsov A. A. The relationship between morphometric parameters of the relief characterizing the cracking of the upper part of the lithosphere and manifestations of volcanism of the Malko-Petropavlovsk Zone, *Geophysical Processes and Biosphere*, 2023, vol.22, no2, pp. 122-133. (In Russian)
- [11] Pavlova V. Yu., Delemen I. F. *Primeneniye metoda georadiolokatsii na Kamchatke* [Application of the ground penetrating radar method in Kamchatka]. Moscow, Publishing House of the Academy of Natural Sciences, 2024, 144 p. (In Russian)
- [12] Vladov M. L., Starovoytov A. V. *Vvedeniye v georadar* [Introduction to ground penetrating radar]. Moscow, Moscow State University Publishing House, 2004, 153 p. (In Russian)
- [13] Starovoytov A. V. *Interpretatsiya dannykh georadara* [Interpretation of ground penetrating radar data]. Moscow, Moscow State University Publishing House, 2008, 192 p. (In Russian)
- [14] Operating manual: Triton-M kit. Ramenskoye, Logical Systems LLC, 2021, 13 p. (In Russian)
- [15] CartScan software package: Operator's manual. Moscow: LogiS LLC, 2022, 94 p. (In Russian)

Information about the author



Pavlova Veronika Yurievna ✉ – PhD (Geol. & Mineral.), Assistant Professor of the Department of Biology and Earth Sciences, Leading Researcher at the International Integrative Research Laboratory of Extreme Phenomena in Kamchatka, Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia,  ORCID 0000-0003-4753-1928.