
Цифровая обработка сигналов и изображений

Научная статья
УДК 621.3.091.22
DOI: <https://doi.org/10.18127/j5604128-202503-02>

Восстановление сигналов георадара, ограниченных по амплитуде, в программе MATRIX

В.В. Варенков¹, Д.С. Горкин²

^{1,2} Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (Москва, Россия)

¹ varenkov@mail.ru, ² gorkin@izmiran.ru

Аннотация

Постановка проблемы. Для успешной интерпретации данных георадиолокации необходимо получать сигналы с большой амплитудой, однако при этом они не должны иметь ограничений по амплитуде. Неослабленный сигнал часто выходит за границы шкалы в верхней части разреза. В связи с этим на практике в каждой точке профиля производится серия измерений с разными ослаблениями. Полный разрез от верха до низа приходится изучать фрагментарно.

Цель. Построить картину полного геологического разреза по всей глубине.

Результаты. Получена целостная картина разреза сверху до низа с детализацией по всей глубине методом георадарной съёмки. Показано существенное повышение динамического диапазона (соотношения сигнал/шум) при практическом построении полного разреза по данным с набором ослаблений.

Практическая значимость. Построение полного разреза сверху до низа с детализацией по всей глубине позволяет наблюдать целостную картину.

Ключевые слова

Георадар, геофизика, ослабление сигнала, геологический разрез

Для цитирования

Варенков В.В., Горкин Д.С. Восстановление сигналов георадара, ограниченных по амплитуде, в программе MATRIX // Электромагнитные волны и электронные системы. 2025. Т. 30. № 3 С. 6–11. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202503-02>

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

Для радиолокации больших глубин, как правило, используют импульсные георадары с резистивно-нагруженными дипольными антеннами. Передатчики в этих приборах содержат газонаполненные разрядники, формирующие видеоимпульсы с напряжением 5 кВ и выше. Это позволяет достигать глубины зондирования до нескольких сотен метров [1–3]. Такую особенность имеют георадары «Грот» [4], «Лоза» [5], «Сфера» [6].

При осуществлении георадарной съёмки приёмник записывает сигналы, излучённые передатчиком и отражённые от подземных объектов и неоднородностей [7, 8]. На рис. 1 продемонстрирован общий принцип работы георадара.

Прохождение электромагнитных волн в различных геологических средах зависит от параметров излучённого сигнала и электрических свойств сред [9]. Важными свойствами являются удельное затухание и скорость распространения электромагнитных волн. Удельное затухание влияет на глубинность зондирования. Знание скорости распространения волн в различных средах необходимо для пересчёта времени прихода отражённого сигнала в метровую глубину.

© Варенков В.В., Горкин Д.С., 2025

В свою очередь, амплитуды приходящих сигналов зависят от нескольких факторов: частоты излучения (длины волны) и мощности передатчика; диаграмм направленности антенн; свойств грунтов; расположения подземных структур; расстояний между передатчиком и приёмником.

Сигнал поступает на приемник, где происходит его оцифровка. Самые большие амплитуды находятся в верхней части сигнала, далее сигнал в процессе прохождения через породы затухает. На фоне затухающего сигнала появляются всплески амплитуд, связанные с границами сред и объектов, а также переотражениями от соседних подземных структур. На рис. 2 представлена типичная форма отражённого сигнала, принимаемого приёмником георадара. На правой шкале время прихода сигнала в наносекундах. Слева – шкала глубин в метрах при выставлении средней скорости прохождения сигнала по всем подповерхностным слоям.

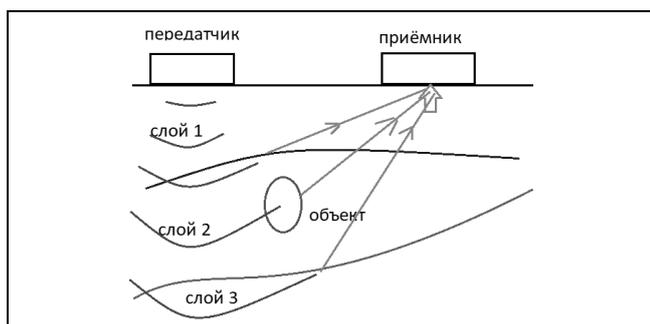


Рис. 1. Общий принцип георадарной съемки

Fig. 1. General principle of ground-penetrating radar survey

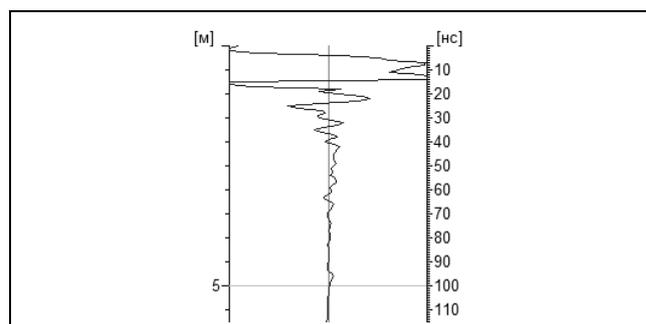


Рис. 2. Типичная форма отражённого сигнала

Fig. 2. Typical shape of the reflected signal

Неослабленный сигнал часто выходит за границы шкалы в верхней части разреза. В связи с этим на практике в каждой точке профиля производится серия измерений с разными ослаблениями. Полный разрез от верха до низа приходится изучать фрагментарно.

Ц е л ь р а б о т ы – построить картину полного геологического разреза по всей глубине.

Материалы и методы исследования

При мощном сигнале, когда требуется достичь максимально большой глубины, амплитуды верхней части выходят за пределы диапазона аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Сигнал обрезается, становится незаметным пик отрицательной и положительной фазы синусоиды. В этих местах информация теряется, поскольку невозможно выявить особенности пришедшего сигнала.

В том случае, когда сигнал слабый, изменения сигнала становятся малозаметными. Если в процессе обработки данных усилить слабый сигнал, то большую роль будет играть точность оцифровки, зависящая от разрядности АЦП. Хотя усиление сигнала может лучше проявить изменения амплитуд, начальная дискретность оцифровки будет давать огрублённую картину.

На рис. 3 показаны три сигнала, снятые в одной точке с разными ослаблениями: 0 dB (без ослабления), 20 dB и 40 dB (здесь dB – ослабление сигнала в децибелах). Видно, что небольшое ослабление не даёт информации об отражениях вверху, но даёт хороший размах амплитуд в глубине.

Для успешной интерпретации данных желательно получать сигналы с большой амплитудой, однако при этом они не должны иметь зашкалов. На практике, если интерес представляют только верхние метры глубины, то подбирается нужное ослабление сигнала. Если верхняя часть разреза неважна, и требуется исследовать на большой глубине, то никаких ослаблений не выставляется. Если же нужно получить качественные данные от самого верха до большой глубины, например, для прослеживания круто падающей малой мощности жилы или контакта пород снизу и до самого выхода, то в каждой точке производятся измерения с набором ослаблений. Возможность съёмки сериями присутствует в георадарах ГРОТ-12 и СФЕРА. Такой метод обеспечивает улучшение динамического диапазона измерений (соотношения сигнал/шум).

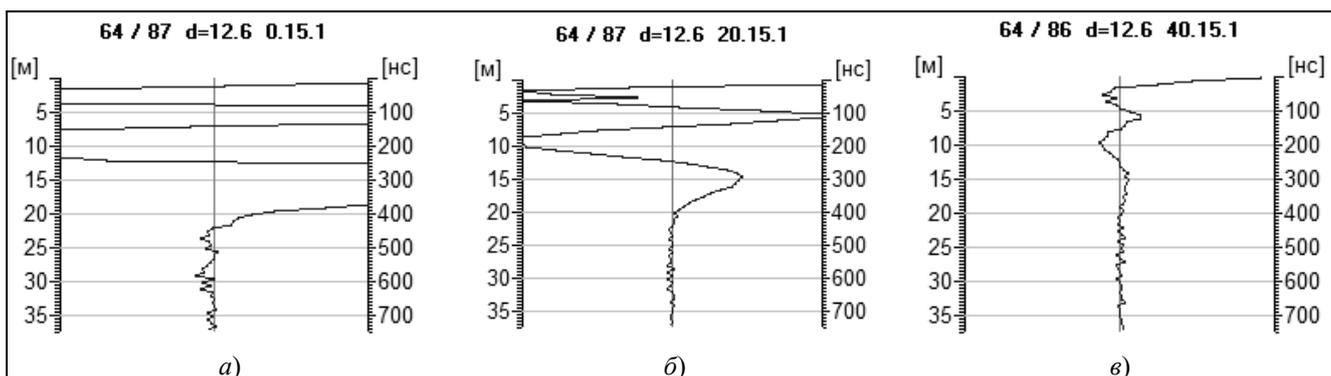


Рис. 3. Отражённые сигналы с ослаблениями: *a* – 0 dB; *b* – 20 dB; *c* – 40 dB

Fig. 3. Reflected signal with attenuations: *a* – 0 dB; *b* – 20 dB; *c* – 40 dB

На рис. 4 представлены 2D-радарограммы одного и того же профиля и принятые сигналы в первой точке для ослаблений: 0 dB (без ослабления), 20 dB и 40 dB. При измерениях в каждой точке профиля снималось три сигнала. Левая 2D-радарограмма самая информативная, но в её верхней части находятся полосы, маскирующие переотражения. Правая 2D-радарограмма (с наибольшим ослаблением) показывает структуры вверху, однако не даёт хорошей картины глубже.

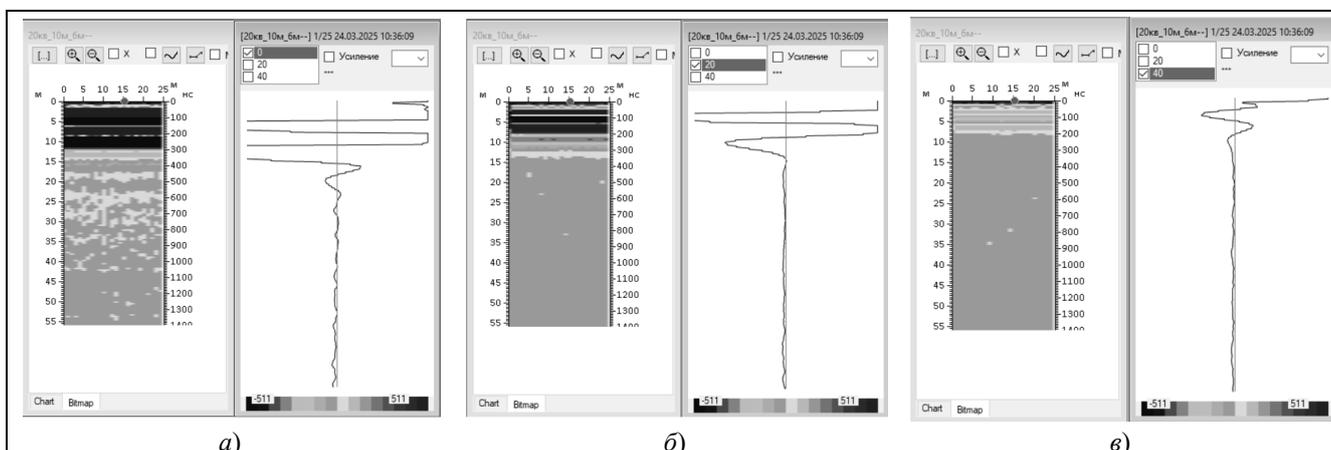


Рис. 4. 2D-радарограммы профиля и сигналы в первой точке для ослаблений: *a* – 0 dB; *b* – 20 dB; *c* – 40 dB

Fig. 4. 2D radargrams of the profile and signals at the first point for attenuations: *a* – 0 dB; *b* – 20 dB; *c* – 40 dB

Камеральная обработка данных, измеренных с набором ослаблений, может производиться отдельно для каждого ослабления. В нижней части разреза используются данные неослабленного сигнала. По мере уменьшения глубины берутся всё более и более ослабленные сигналы.

Результаты и их обсуждение

В случае, когда требуется обработать и визуализировать полный разрез сверху до низу как единое целое, реализуется метод «сшивки» полного сигнала по ослаблениям. Выполняется следующий алгоритм. Основой является неослабленный сигнал. Для мест, в которых есть зашкал, берётся ослабленный сигнал, в котором в данном месте нет зашкала, и его амплитуда умножается на 10dB/20, компенсируя при этом ослабление.

Данный алгоритм был реализован в программах MATRIX [10] и Grot [11]. На рис. 5 представлен результат восстановления полной картины разреза по данным георадиолокации, снятым с набором ослаблений в каждой точке профиля.

Можно заметить, что диапазон амплитуд на восстановленном сигнале увеличился от 511 до 18700, т.е. в 36 раз, без потери качества синусоиды сигнала. Следовательно, данный метод съёмки и восстановления может быть использован для глубоких исследований.

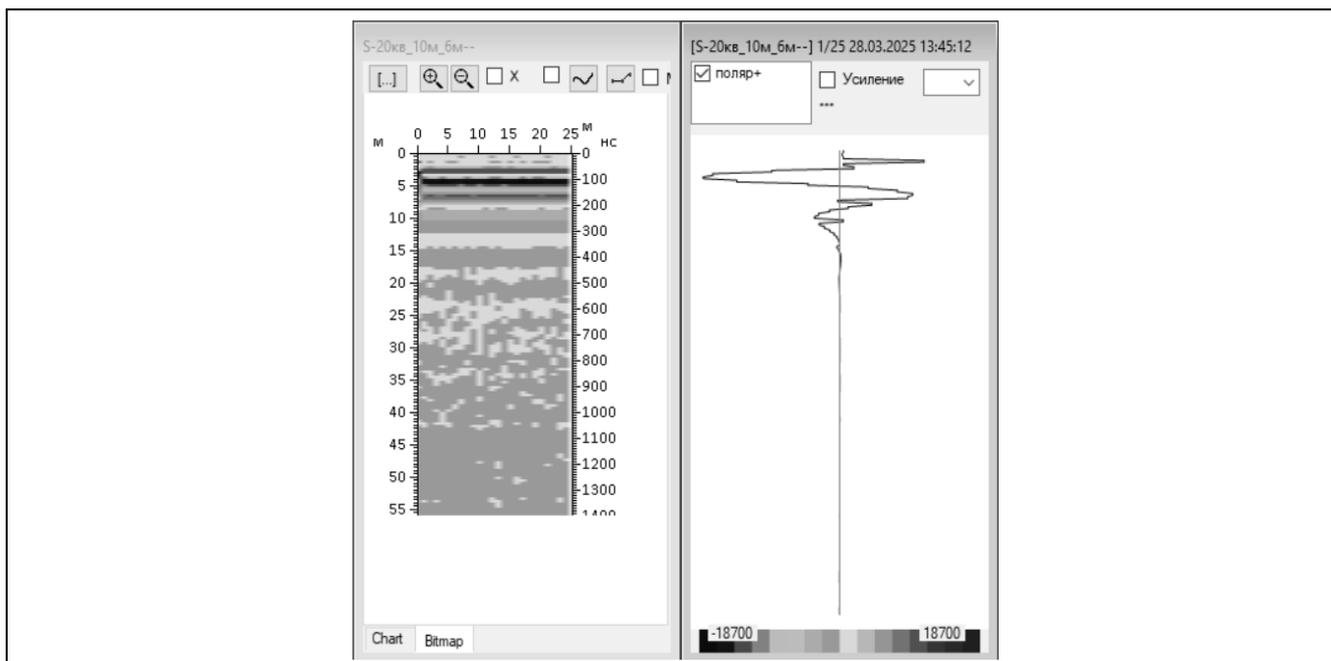


Рис. 5. Полная картина разреза, восстановленная по набору сигналов с разными ослаблениями

Fig. 5. A complete picture of the section, reconstructed from a set of signals with different attenuations

Условиями для качественной сшивки сигналов являются правильное выставление верха сигнала и отсутствие сильных помех. Полный сигнал, сшитый из набора ослаблений, может иметь большой перепад амплитуд. Диапазон перепада зависит от частоты передатчика. Для лучшей визуализации сшитый сигнал удобно представлять в логарифмическом масштабе или усиливать в нижней части. Отраженные сигналы представлены на рис. 6.

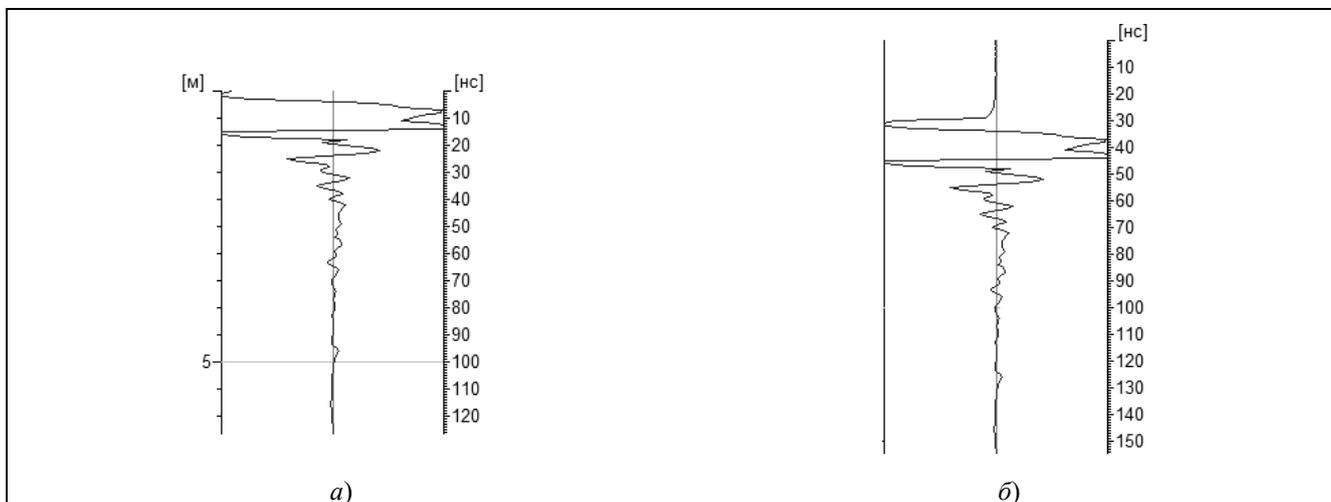


Рис. 6. Отражённый сигнал: *a* – с установленным началом; *б* – полный входящий сигнал

Fig. 6. Reflected signal: *a* – with established start; *b* – full incoming signal

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что метод георадарной съемки с набором ослаблений и последующим восстановлением полезен для глубоких исследований. Он позволяет получить целостную картину разреза сверху до низа с детализацией по всей глубине. Практическое построение полного разреза по данным с набором ослаблений показывает существенное повышение динамического диапазона (соотношения сигнал/шум).

Список источников

1. Попов А.В., Прокопович И.В., Едемский Д.Е., Морозов П.А., Беркут А.И. Глубинный георадар: принципы и применение // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23. № 4. С. 28–36.
2. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Ляхов Г.А., Резников А.Е. Георадиолокация больших глубин // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 5. DOI 10.30898/1684-1719.2019.4.6.
3. Гулевич О.А., Волкомирская Л.Б., Долгих Ю.Н., Кайгородов Е.П., Санин С.С., Варенков В.В., Резников А.Е., Тригубович Г.М., Чернышев А.В. Опыт исследования криолитозоны методом отраженных электромагнитных волн (МОЭМВ) на глубину свыше 500 метров // Сборник тезисов науч.-практич. конф. «Электроразведка 2021». М.: Издательский дом Академии Естествознания. 2021. С. 82–88.
4. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Варенков В.В., Резников А.Е., Сахтеров В.И. Современные георадары серии «ГРОТ» для экологического мониторинга // Экологические системы и приборы. 2012. № 5. С. 3–5.
5. Пупатенко К.В., Нелюбов П.А. Исследование электромагнитного излучения радиочастотного диапазона георадара «Лоза» // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2019. № 7. С. 78–83.
6. Варенков В.В., Горкин Д.С., Смирнов Д.А., Сахтерова Т.В., Сахтеров В.И. Результаты экспериментов с георадаром «Сфера» // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. № 5. С. 66–70. DOI 10.18127/j15604128-202405-10.
7. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М.: Недра. 1986. 126 с.
8. Патент на полезную модель RUS218691 от 06.06.2023. Георадар для радиолокационного зондирования подстилающей поверхности / Горкин Д.С., Варенков В.В., Сахтеров В.И.
9. Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений: учеб. пособие. М.: ГЕОС. 2017. 240 с.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663673 от 27.06.2023. MATRIX / Горкин Д.С., Варенков В.В.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023668672 от 31.08.2023. Grot / Варенков В.В., Волкомирская Л.Б.

Информация об авторах

Владимир Викторович Варенков – науч. сотрудник

SPIN-код: 6186-9270

Дмитрий Сергеевич Горкин – науч. сотрудник

SPIN-код: 5641-7300

Статья поступила в редакцию 25.04.2024

Одобрена после рецензирования 26.05.2025

Принята к публикации 02.06.2025

ЖУРНАЛ «АНТЕННЫ»

Главный редактор: член-корреспондент РАН **Владимир Степанович Верба**



Международный научно-технический и теоретический журнал, в котором публикуются оригинальные и обзорные статьи по основным направлениям теории и техники антенн, фидерных устройств и электродинамики СВЧ.

Основан А.А. Пистолькорсом

Включен в Перечень ВАК

Издается с 1966 г.

ISSN 0320-9601

Периодичность – 6 номеров в год

«Пресса России» – индекс 83826

Научные специальности ВАК

- 1.3.4. Радиофизика
- 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения
- 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии
- 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций
- 2.2.16. Радиолокация и радионавигация
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации

Полный перечень журналов и книг, выпускаемых Издательством Радиотехника, размещен на сайте <http://www.radiotec.ru>

Адрес Издательства:

101000, г. Москва, Подсосенский пер., д. 14, стр. 2, тел. +7(495)625-92-41

<http://www.radiotec.ru>, e-mail: info@radiotec.ru

Original article

Restoring amplitude-limited ground penetrating radar signals in MATRIX

V.V. Varenkov², D.S. Gorkin²

^{1,2} Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation (Moscow, Russia)

¹ varenkov@mail.ru, ² gorkin@izmiran.ru

Abstract

For successful interpretation of ground penetrating radar data, it is desirable to obtain signals with a large amplitude, but so that they do not have amplitude limitations. To study the upper part of the section, attenuation is used. Usually, the entire section from top to bottom is studied fragmentarily. The method described in the article allows one to construct a complete picture of the section along the entire depth based on the survey results. The algorithm for constructing a section based on data with a set of attenuations shows a significant increase in the dynamic range (signal/noise ratio). The practical significance of the method lies in obtaining a complete picture of the section from top to bottom with detailing along the entire depth.

Keywords

Ground penetrating radar, geophysics, signal attenuation, geological section

For citation

Varenkov V.V., Gorkin D.S. Restoring amplitude-limited ground penetrating radar signals in MATRIX. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2025. V. 30. № 3. P. 6–11. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202503-02> (in Russian)

References

1. Popov A.V., Prokopovich I.V., Edemsky D.E., Morozov P.A., Berkut A.I. Deep penetration subsurface radar: principles and application. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2018. V. 23. № 4. P. 28–36. (in Russian)
2. Volkovskaya L.B., Gulevich O.A., Lyakhov G.A., Reznikov A.E. Deep georadiolocation. *Journal of Radio Electronics*. 2019. № 4. P. 5. DOI 10.30898/1684-1719.2019.4.6. (in Russian)
3. Gulevich O.A., Volkovskaya L.B., Dolgikh Yu.N., Kaigorodov E.P., Sanin S.S., Varenkov V.V., Reznikov A.E., Trigubovich G.M., Chernyshev A.V. The experience of studying the cryolithozone by reflected electromagnetic waves (MOEMW) to a depth of more than 500 meters. Collection of scientific abstracts-practical conference "Electrical Exploration 2021". Moscow: Publishing House of the Academy of Natural Sciences. 2021. P. 82–88. (in Russian)
4. Volkovskaya L.B., Gulevich O.A., Varenkov V.V., Reznikov A.E., Sakhterov V.I. Modern GPR "Grot" series for environmental monitoring. *Ecological systems and devices*. 2012. № 5. P. 3–5. (in Russian)
5. Pupatenko K.V., Nelyubov P.A. Investigation of electromagnetic radiation of the GPR "Loza" in the radio frequency band. Designing the development of the regional railway network. 2019. № 7. P. 78–83. (in Russian)
6. Varenkov V.V., Gorkin D.S., Smirnov A.D., Sahterova T.V., Sahterov V.I. The results of experiments with the GPR "Sphere". *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2024. V. 29. № 5. P. 66–70. DOI 10.18127/j15604128-202405-10. (in Russian)
7. Finkelstein M.I., Kutev V.A., Zolotarev V.P. Application of radar subsurface sounding in engineering geology. Moscow: Nedra. 1986. 126 p. (in Russian)
8. Utility model patent RUS218691 dated 06.06.20234. Georadar for radar sensing of the underlying surface. Gorkin D.S., Varenkov V.V., Sakhterov V.I. (in Russian)
9. Vladov M.L., Sudakova M.S. Georadiolocation. From the physical foundations to promising areas: studies. textbook. Moscow: GEOS. 2017. 240 p. (in Russian)
10. Certificate of state registration of the computer program № 2023663673 dated 27.06.2023. MATRIX. Gorkin D.S., Varenkov V.V. (in Russian)
11. Certificate of state registration of a computer program № 2023668672 dated 31.08.2023. Grot. Varenkov V.V., Volkovskaya L.B. (in Russian)

Information about the authors

Vladimir V. Varenkov – Research Scientist

Dmitiy S. Gorkin – Research Scientist

The article was submitted 02.04.2024

Approved after reviewing 26.05.2025

Accepted for publication 02.06.2025