

ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ ГЕОРАДАРНОГО СИГНАЛА И РАДИООБРАЗЫ ПОДЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

П.А. Морозов^{1,2}, Ф.П. Морозов², А.В. Попов¹, И.В. Прокопович^{1,3}

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пуцкова (ИЗМИРАН), 108840, Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, 4,

E-mail: popov@izmiran.ru

²ООО «Компания ВНИИСМИ», 127566, Москва, Алтуфьевское шоссе, д. 44, офис 912

E-mail: vniismi@list.ru

³МИРЭА – Российский технологический университет, 119454, Москва, пр. Вернадского, 78

Аннотация. Георадар позволяет оперативно, ненарувающим способом, исследовать диапазон глубин от единиц до десятков метров. За счет повышенной мощности зондирующего импульса георадар дает возможность обеспечивать большую глубину зондирования даже в сложных условиях влажных глин с большим поглощением. Георадар позволяет получать непрерывную информацию о строении геологической среды на большую глубину с шагом от десятка сантиметров. Для успешной интерпретации георадарных данных необходима информация о диаграмме направленности сигнала и строении радиообразов, которыми отображаются реальные подземные объекты на радарограммах. В докладе приводятся результаты оценки диаграмм направленности, полученные с помощью модельных расчетов и по экспериментальным данным.

Ключевые слова: георадар; импульсное электромагнитное зондирование; диаграмма направленности; радиообразы подземных объектов.

GEORADAR DIRECTIVITY PATTERN AND IMAGES OF UNDERGROUND OBJECTS

П.А. Морозов, Ф.П. Морозов, А.В. Попов, И.В. Прокопович

Abstract. Georadar (GPR) allows one to quickly explore the depth range from units to tens of meters in a non-disruptive way. Due to increasing of the probing pulse power, georadar makes it possible to provide a greater sensing depth even in difficult conditions on wet clays with high absorption. GPR allows one to receive continuous information about the structure of the geological environment to a great depth in increments of a dozen centimeters. For successful interpretation of GPR data, information about the radiation pattern of the signal and the structure of radio images that display real underground objects on radar images is needed. The report presents the results of estimates of GPR directivity patterns obtained by using model calculations and experimental data.

Keywords: георадар; пульсированное электромагнитное зондирование; радиообразы подземных объектов.

Введение

Успешное практическое применение георадаров связано с решением двух проблем. Первая связана с поглощающими свойствами среды. Георадар должен обеспечивать глубину зондирования, которая будет устраивать пользователей (геологов, строителей, археологов и т.д.). Вторая проблема связана со сложностью интерпретации радарограмм и радиообразов подземных объектов и структур. Доклад посвящен результатам поэтапного продвижения в решении проблем интерпретации.

Применение георадара в археологии позволяет получить существенно больше информации для оценки диаграммы направленности антенн и сравнения получаемых радиообразов с реальными подземными объектами, чем другие варианты применения георадара (геологоразведка, инженерная геология и т.п.). Работая с археологами, всегда можно увидеть раскопанный объект исследования, измерить глубину, размеры и зарисовать форму. В других сферах применения подповерхностного электромагнитного зондирования это случается крайне редко. Все экспериментальные данные, которые анализируются в докладе, получены с применением среднечастотной версии георадара «Лоза» (50–300 МГц). Отличительной особенностью приборов этой серии, по сравнению с известными зарубежными и отечественными аналогами, является большой энергетический потенциал, позволяющий работать в средах с высокой проводимостью. Георадары серии «Лоза» разработаны и серийно

выпускаются в России ООО «Компания ВНИИСМИ». С целью достижения высоких энергетических показателей была полностью пересмотрена классическая схема построения радара. Так, импульсная мощность передатчика была увеличена более чем в 10 000 раз [4, 5].

Важной характеристикой георадара и его антенн является диаграмма направленности излучения в подповерхностную среду и приема отраженного сигнала. Знание диаграммы направленности играет большую роль в интерпретации георадарных данных [6, 7, 8]. Диаграмма направленности исследовалась двумя методами.

В первом случае по экспериментальным данным отражений от известных подземных объектов – в основном, линейно-протяжённых, восстанавливалась азимутальная зависимость амплитуды принимаемого сигнала. Измерение амплитуды сигнала выполнялось двумя способами: фиксацией амплитуды отражения в разных секторах диаграммы направленности при пересечении объекта несколькими профилями зондирования (рис. 1 а-г). Второй вариант обмера выполнялся вращением антенн радара над (или под) линейным объектом в азимутальной плоскости с фиксацией амплитуды в каждом положении (рис. 1 д, е).

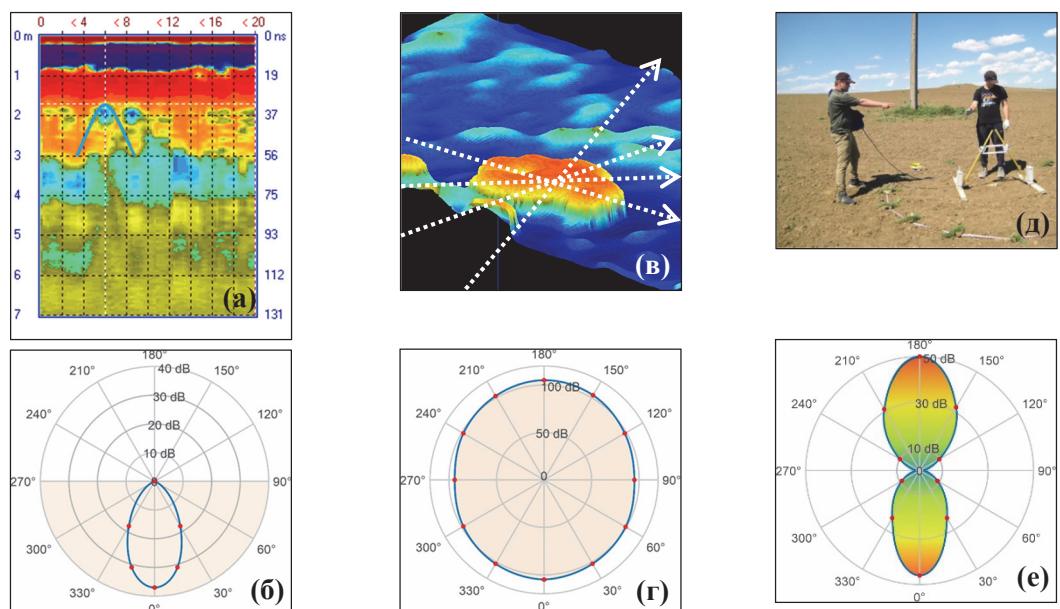


Рис. 1. Варианты оценки диаграммы направленности, (а, б) – радарограмма и вертикальная диаграмма направленности (оценка по протяженному подземному объекту – две трубы), (в, г) – радарограмма и горизонтальная диаграмма направленности (оценка по локализованному подземному объекту), (д, е) – оценка горизонтальной диаграммы направленности в верхней полуплоскости по отражению от линии электропередач

Для различных вариантов характеристик среды выполнялись двумерные и трехмерные расчеты диаграммы направленности для реалистичных моделей антенн, заданных в виде проводящей полосы, лежащей на диэлектрическом полупространстве.

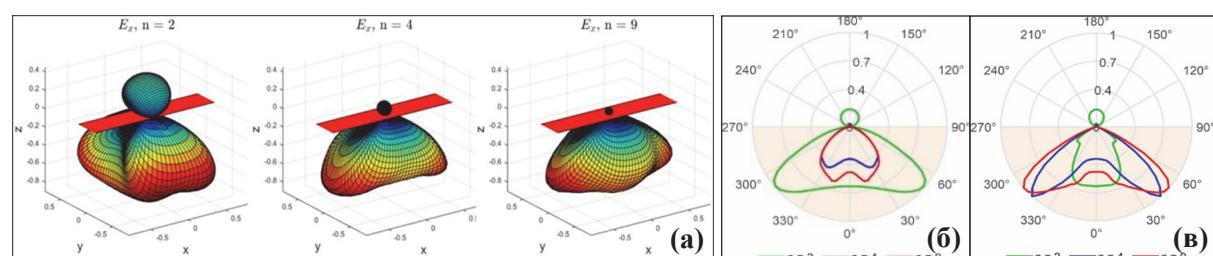


Рис. 2. Рассчитанные 3D и 2D диаграммы направленности, (а) трехмерные диаграммы для $n = 2, 4, 9$, (б) сечение диаграмм направленности в плоскости H (перпендикулярно оси диполя), (в) – в плоскости E (вдоль оси диполя)

Рассчитанные и экспериментальные оценки диаграммы направленности позволяет точнее интерпретировать подземные геологические структуры и идентифицировать локальные подземные объекты по их радиообразам на георадарных сечениях. Каждая радарограмма (изменение амплитуды и фазы отраженного сигнала вдоль трассы зондирования с вертикальной шкалой времени задержки) отражает вертикальное строение грунтов вдоль линии георадарного профиля. Диапазон изменения временной формы сигнала передается палитрой цветов – цвет на георадарном разрезе отражает амплитуду и фазу отраженного сигнала. Амплитуда положительной фазы сигнала, условно (+), отражается «теплыми» цветами палитры – от желтого до красного. Амплитуда отрицательной части сигнала, условно (-), отражается «холодными» цветами – от желтого до синего и фиолетового. По границам, разделяющим участки разного цвета, можно выделять геологические слои, структуры и объекты.

Электромагнитный сигнал георадара отражается от резких границ в грунте, контрастных по диэлектрической проницаемости и проводимости. Чем резче контраст этих параметров, тем больше амплитуда отраженного сигнала. Опытный оператор получает из цветных радарограмм необходимую для практики информацию: если выделенный объект проявляется на горизонтальных сечениях условно «теплым» тоном цвета, а вмещающая среда (грунт) имеет условно более «холодный» тон, это означает, что объект более диэлектрически плотный, чем вмещающая среда. Анализ вертикальных и горизонтальных георадарных сечений позволяет выделять аномальные объекты на фоне горизонтально-слоистого строения по ряду характерных признаков: горизонтальные размеры, форма (прямоугольная, круглая), глубина, ориентация по странам света, контрастность границ, характер смены цвета при переходе через границы слоев, строение сечений на вертикальных разрезах («прямоугольное», «сводчатое», «ступенчатое» и т.п.), повторение сечений с характерным строением на параллельных соседних профилях. Объекты с такими характеристиками с большой вероятностью могут оказаться рукотворными и представлять интерес для археологических исследований. Окончательный вывод о «статусе» аномалии (археологический объект или геологическая аномалия) могут дать только археологи, выполнив заверочный раскоп.

Приведем несколько свежих примеров использования георадара в археологических экспедиционных работах. Экспериментальные георадарные данные получены в рамках геофизического сопровождения и сотрудничества с археологическими экспедициями Института востоковедения РАН, Института археологии РАН, Института археологии Крыма РАН и Государственного Эрмитажа.

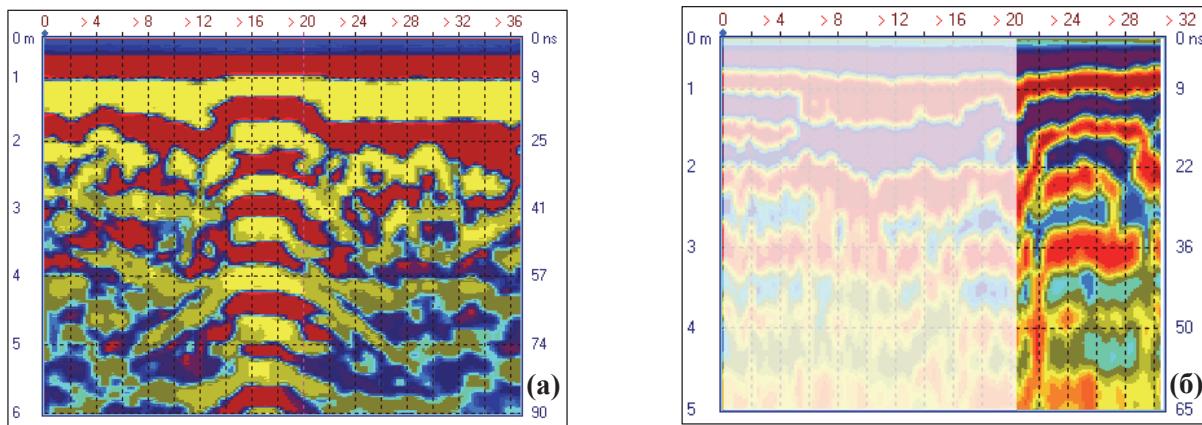


Рис. 3. Радиообразы подземных археологических объектов, (а) склеп Сурхай хан 1(1640 г.), (Дагестан), (б) склеп, (III в. до н.э. – II в. н.э.), некрополь Гебель эль-Нур, Египет

Приведенные радиообразы подземных археологических объектов демонстрируют, что при правильной организации георадарного обследования с учетом диаграммы направленности антенн, результаты обследования точней интерпретируются и становятся легко узнаваемыми в многообразии структур на радарограммах.

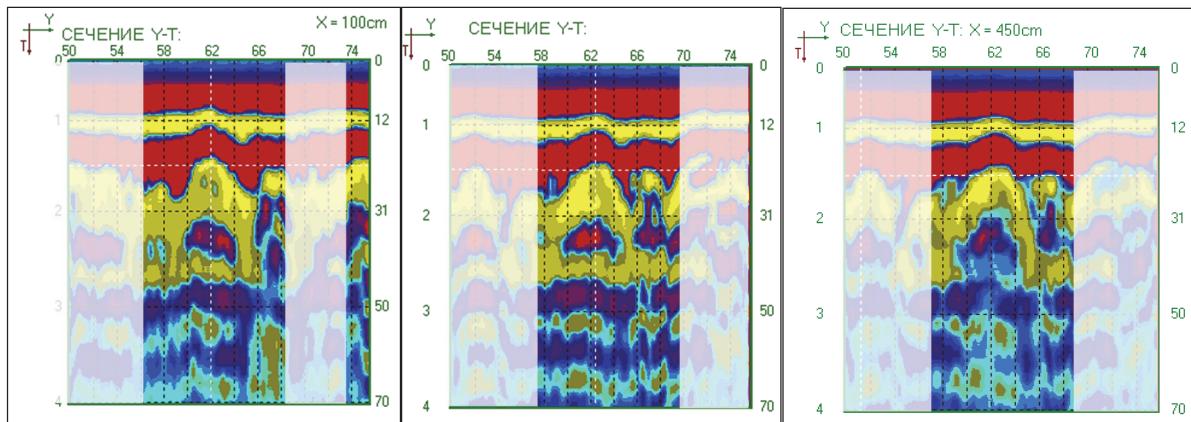


Рис. 4. Три параллельных сечения склепа (некрополь Гебель эль-Нур, Египет).

Примеры склепов на рисунках 3 и 4 однозначно интерпретируются, как крупные подземные объекты древней погребальной культуры. Дополнительно, по виду радиообразов, можно сделать заключение, что эти подземные объекты не нарушены и не были ограблены

Заключение

В результате теоретических и экспериментальных исследований получен ряд оценок диаграммы направленности георадарного сигнала для различных условий распространения электромагнитного импульса. Модельные расчетные и экспериментальные оценки позволяют точнее представить радиообраз подземного объекта и улучшить интерпретацию радарограмм. Наработанный опыт позволил сформулировать ряд характерных признаков, которые дают возможность выделять антропогенные рукотворные подземные объекты среди многообразия структур, регистрируемых георадаром. Этот результат особенно приветствуется археологами. После георадарного обследования, археологи могут на свое усмотрение выбирать объект и раскапывать его «адресно». Поисковые разведочные раскопки теряют необходимость, объем земляных работ сокращается в десятки раз. Результаты георадарного обследования передаются руководителям экспедиций в виде таблиц координат объектов.

Благодарности

Экспериментальные и теоретические исследования выполнены в рамках геофизических экспедиций при поддержке гранта РНФ № 22-12-00083 «Глубинный георадар: теория, методы, эксперимент», выполняемого в Институте земного магнетизма ионосфера и распространения радиоволн РАН (ИЗМИРАН).

Список литературы

1. Berkut A.I., Edemsky D.E., Kopeikin V.V., Morozov P.A.; Prokopovich I.V., Popov A.V. Deep penetration subsurface radar: Hardware, results, interpretation // In Proceedings of the 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR 2017), Edinburgh, UK, 2017. – P. 1–6.
2. Berkut A.I., Krinitsky L.M., Kopeikin V.V., Morozov P.A., Popov A.V., Prokopovich I.V. Deep Penetration Radar: Hydrogeology and Paleorelief of Underlying Medium// 17th International Conference on Ground Penetrating Radar – GPR-2018. Rapperswil. Switzerland. June 18–21. 2018. – P. 394–398.
3. Morozov P., Morozov F., Lazarev M. Bogolyubov L., Popov A. Characterization of antenna radiation pattern and penetration depth in ground penetrating radar field missions // Remote Sensing. – 2023. – V. 15. – N 23. – P. 5452.
4. Morozov P., Prokopovich I., Lazarev M., Popov A., Sakhterov V. and Edemsky D. Characterization of GPR radiation pattern in the upper and lower hemisphere (theory and experiment). // GPR 2024, Chanchun, China, 06, 2024.
5. Боголюбов Л.А., Лазарев М.А., Морозов Ф.П., Морозов П.А., Попов А.В., Прокопович И.В. Оценка диаграммы направленности дипольной антенны георадара в подповерхностной среде и в верхней полусфере // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2024. – Т. 29. – С. 82–88.