

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

**Научная сессия Отделения общей физики и астрономии
Российской академии наук**

(26 января 2000 г.)

26 января 2000 г. в Институте физических проблем им. П.Л. Капицы РАН состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии Российской академии наук. На сессии были заслушаны доклады:

1. **Арманд Н.А., Андрианов В.А., Лукин Д.С., Чубинский Н.П.** (ИРЭ, г. Фрязино, Московская обл.). *Научные проблемы и современное состояние поверхностной радиолокации.*

2. **Резников А.Е., Копейкин В.В., Морозов П.А., Щекотов А.Ю.** (ИЗМИРАН, г. Троицк, Московская обл.). *Разработка аппаратуры, методов обработки данных для электромагнитного подповерхностного зондирования и опыт их применения.*

Краткое сообщение по второму докладу публикуется ниже.

PACS numbers: 07.05.Kf, 07.57.-c, 07.90.+c, 84.40.-x

**Разработка аппаратуры,
методов обработки данных
для электромагнитного
подповерхностного зондирования
и опыт их применения**

А.Е. Резников, В.В. Копейкин,
П.А. Морозов, А.Ю. Щекотов

1. Развитие радиофизических методов в геологии

Теоретические основы применения радиоволн для изучения геологических структур были заложены Г. Лови и Г. Леймбахом в 1910 г., а в 1912 г. ими обоснована возможность поисков руд и грунтовых вод радиоинтерференционными методами. В нашей стране первые опытные работы электроразведочными методами, использующими радиочастотные сигналы, начаты в 1925 г. А.А. Петровским [1].

Эффект отражения импульсных электромагнитных волн от подповерхностных неоднородностей был случайно обнаружен А. Уэйтом в 1957 г. на ледовом аэродроме в Антарктиде, когда он обратил внимание на то, что радиовысотомер самолета показывал высоту 900 футов еще до момента его отрыва от взлетной полосы [2].

Использование стандартной локационной аппаратуры в геофизике оказалось возможным в ограниченном числе случаев, когда затухание радиоволн в среде мало, например, для зондирования сухих песчаников, известняков и каменной соли. Для подавляющего большинства земных пород затухание радиоволн очень велико и для обычных локаторов время прихода отраженных сигналов оказывается столь малым, что они накладываются на зондирующий импульс и не могут быть зарегистрированы [3].

Для увеличения разрешения и потенциала локатора предпринимались попытки использовать широкополосные сигналы с линейной частотной модуляцией или шумоподобные с фазовой модуляцией. Хотя такие попытки продолжаются до сих пор, локаторы, основанные на этом принципе, не дают удовлетворительного разрешения подземных неоднородностей, поскольку база сигнала в большинстве практических случаев оказывается больше, чем время распространения волны от отдельных неоднородностей. Это приводит к тому, что на выходе устройства обработки соседние сигналы плохо разрешаются.

Выход из положения был найден тогда, когда вместо обычного радиолокационного импульса с высокочастотным заполнением стали применять импульс без несущей, который представляет собой одно или несколько колебаний тока в антенне и имеет относительную полосу спектра, близкую к единице. Такой моноимпульсный сигнал обладает наилучшими характеристиками для георадара, поскольку обеспечивает максимальную глубину зондирования и максимальное разрешение. Это есть предельный случай трансформации обычного радиоимпульса, когда мы начинаем снижать частоту несущей, чтобы увеличить глубину зондирования, и одновременно уменьшать длительность огибающей, чтобы увеличить разрешающую способность.

Способ формирования такого импульса был предложен в 1960 г. И.К. Куком и до сих пор используется в георадарах. В этом способе, получившем название "метода ударного возбуждения антенны", на передающую антенну подается перепад напряжения, который и формирует импульс [4].

Частотный диапазон современных георадаров обычно лежит в пределах 50–500 МГц, что является компромиссом между глубиной зондирования в еди-

нищи-десятки метров и разрешающей способностью в единицы-десятки сантиметров для реальных геологических структур. Получили развитие и более высокочастотные радары, имеющие верхнюю частоту до 40 ГГц, которые имеют глубину зондирования в единицы-десятки сантиметров и используются, в основном, для анализа состояния бетонных строительных конструкций и которые трудно отнести к геологическим приборам.

Технические характеристики практически всех георадаров, так и их схемные решения мало чем отличаются друг от друга. За основу технического решения принят метод стробоскопического преобразования спектра сигнала в область низких частот, в которой и происходит его регистрация. Ударное возбуждение антенны осуществляется транзисторами в лавинном режиме с перепадом напряжения около 50 В.

Основные технические проблемы, связанные с таким схемным решением, — это сложность обеспечения большого динамического диапазона, постоянства амплитудно-частотной и линейности фазо-частотной характеристик стробоскопического преобразования в приемном тракте, что приводит к паразитным колебаниям ("звону") сигнала и маскировке слабых сигналов более сильными. "Звон" приемного тракта является основной причиной малого реального потенциала радаров, который обычно составляет 40–50 дБ. (Под реальным потенциалом мы понимаем то ослабление сигнала в среде, при котором радар способен обнаруживать подземные объекты. Отметим, что довольно часто в описаниях георадаров приводят значение его потенциала, вычисленное как отношение мощности передатчика к чувствительности приемника, который не позволяет оценить реальные возможности прибора.)

В последнее время в США и Австралии ведутся работы по созданию нового типа георадаров с частотным сканированием. Побудительным мотивом этих работ явилась попытка избежать "звона" сигнала в приемном тракте. В этой схеме локатор работает последовательно на сетке частот и регистрирует спектр сигнала. После этого спектр нормируется на предварительно снятую частотную характеристику приемного тракта и преобразуется во временную область. Этот прием очень хорошо очищает сигналы от "звона", однако поднять реальный потенциал локатора пока не удается, поскольку возникает новая проблема — регистрация слабого отраженного сигнала на фоне непрерывно работающего рядом собственного передатчика.

2. Конструктивные особенности современных георадаров

Все известные георадары могут обеспечить глубину зондирования в несколько метров только на слабопоглощающих радиоволны грунтах, по своим параметрам близким к сухому песку, что делает их малоперспективными для средней полосы России и других мест, где преобладают глинистые почвы.

Основная задача, которую мы ставили перед собой при проектировании георадаров нового поколения, — это достижение максимально возможного реального потенциала прибора [5].

Эта цель достигается двумя основными способами — использованием мощного передатчика и регистрацией сигнала в его собственном спектре частот, без стробоскопического преобразования сигнала в область низких

частот. Другими словами, мы исключили большинство операций над сигналом, которые могут приводить к возникновению "звона" [6].

Для того чтобы обеспечить необходимые параметры обнаружения объекта, нам пришлось разработать малогабаритный передатчик с импульсной мощностью 1 МВт. Он представляет собой современную версию искровых передатчиков времен А.С. Попова и Г. Маркони, применявшихся в первых опытах по радиосвязи.

Примененный нами способ регистрации основан на использовании быстродействующих компараторов, которые сравнивают входящий сигнал с некоторым заданным порогом. Изменяя величину порога и коэффициент усиления приемника, можно регистрировать сигнал в большом диапазоне его значений. Если при стробоскопическом способе за один излученный импульс передатчика регистрируется значение амплитуды сигнала в один момент времени, то в использованном нами способе за один импульс фиксируются моменты превышения сигналом порога по всей временной координате.

Наиболее подходящей антенной как приемной, так и передающей оказался резистивно-нагруженный диполь, в котором часть энергии импульса поглощается на распределенных вдоль его плечей резисторах. Подбирая величину резисторов, можно обеспечить практически полное демпфирование паразитных колебаний импульса.

Оптимальной конструкцией направленной антенны, используемой в условиях активных и пассивных внешних помех, оказалась "безэховая камера" без металлических деталей. Она представляет собой резистивно-нагруженный диполь, накрытый диэлектрическим ящиком, заполненным углеродным радиопоглотителем, который поглощает воздушную волну.

Приведем основные технические характеристики базовой модели разработанного георадара:

- 1) диапазон рабочих частот 30–500 МГц;
- 2) импульсное напряжение на выходе передатчика 5 кВ;
- 3) чувствительность приемника 75 мкВ;
- 4) частота дискретизации данных 1 нс;
- 5) потребление от аккумулятора 12 В в режиме регистрации 2 А, в режиме просмотра 0,5 А;
- 6) вес 10 кг.

Радар оснащен жидкокристаллическим индикатором 128 × 256 элементов и имеет встроенную память объемом 4 Мбайт. Он может работать автономно, т.е. в режиме регистрации с выводом информации на индикатор с последующей (в случае необходимости) перекачкой информации в компьютер по стыку RS-232, а также в составе с компьютером типа "Notebook".

Измерение реального потенциала георадара осуществлялось следующим образом. Георадар ставился на поплавки и перемещался от берега к центру глубокого водоема. В процессе движения фиксировалась глубина, на которой отражение от дна исчезало из-за поглощения радиоволн водой. По записям амплитудной функции определялось погонное затухание как отношение изменения амплитуды к разности глубин. Реальный потенциал определялся как произведение погонного затухания на глубину, на которой сигнал пропал. Для георадаров описанной конструкции измеренный реальный потенциал составляет величину не менее 120 дБ.

3. Методы обработки данных

На получаемых радарограммах практически отсутствуют паразитные колебания — "звон" аппаратуры, характерный для остальных георадаров. По этой причине мы не пользуемся стандартными программами обработки георадарных сигналов, основная задача которых уменьшить величину "звона" и выделить на его фоне сигнал с помощью разного рода фильтраций.

Принятый нами в настоящее время способ восстановления геологического профиля по радарограмме основывается на использовании методики, которая известна в сейсмологии под названием "общий пункт возбуждения" (ОПВ).

Сначала снимается радиолокационный профиль, перемещаясь по трассе с прибором, в котором расстояние между приемной и передающей антеннами фиксированы. По радарограмме определяются точки, в которых необходимо произвести зондирование, т.е. в соответствии с методом ОПВ получить годографы от слоев и объектов. Годограф — это функция задержки сигнала от слоя (объекта) в зависимости от расстояния между приемной и передающей антеннами при симметричном разноме их в разные стороны.

Годограф позволяет определить как истинную глубину слоя, так и скорость распространения волны в нем. Для того чтобы преобразовать радарограмму в геологическое сечение, необходимо исключить кратные отражения от слоев и трансформировать временную ось в пространственную, задавая скорость волны в слое. Вся

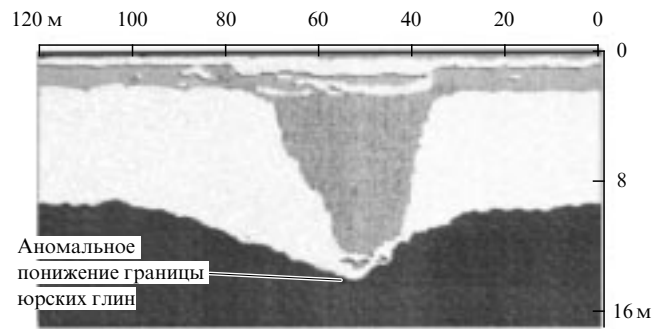


Рис. 1. Георадарный разрез структуры в районе провала на улице Большая Дмитровка.

необходимая для этого информация может быть получена из годографа.

Использование квазисейсмического подхода для получения геологического сечения не может считаться удовлетворительным, поскольку не используется часть информации, заключенная в амплитуде сигнала, его временной форме и поляризации. В настоящее время разрабатывается математический аппарат для решения обратной задачи радиолокационного зондирования в электродинамической постановке.

Основа метода заключается в получении решения прямой электродинамической задачи для достаточно произвольной модели среды с изменяющейся диэлектрической проницаемостью и проводимостью.

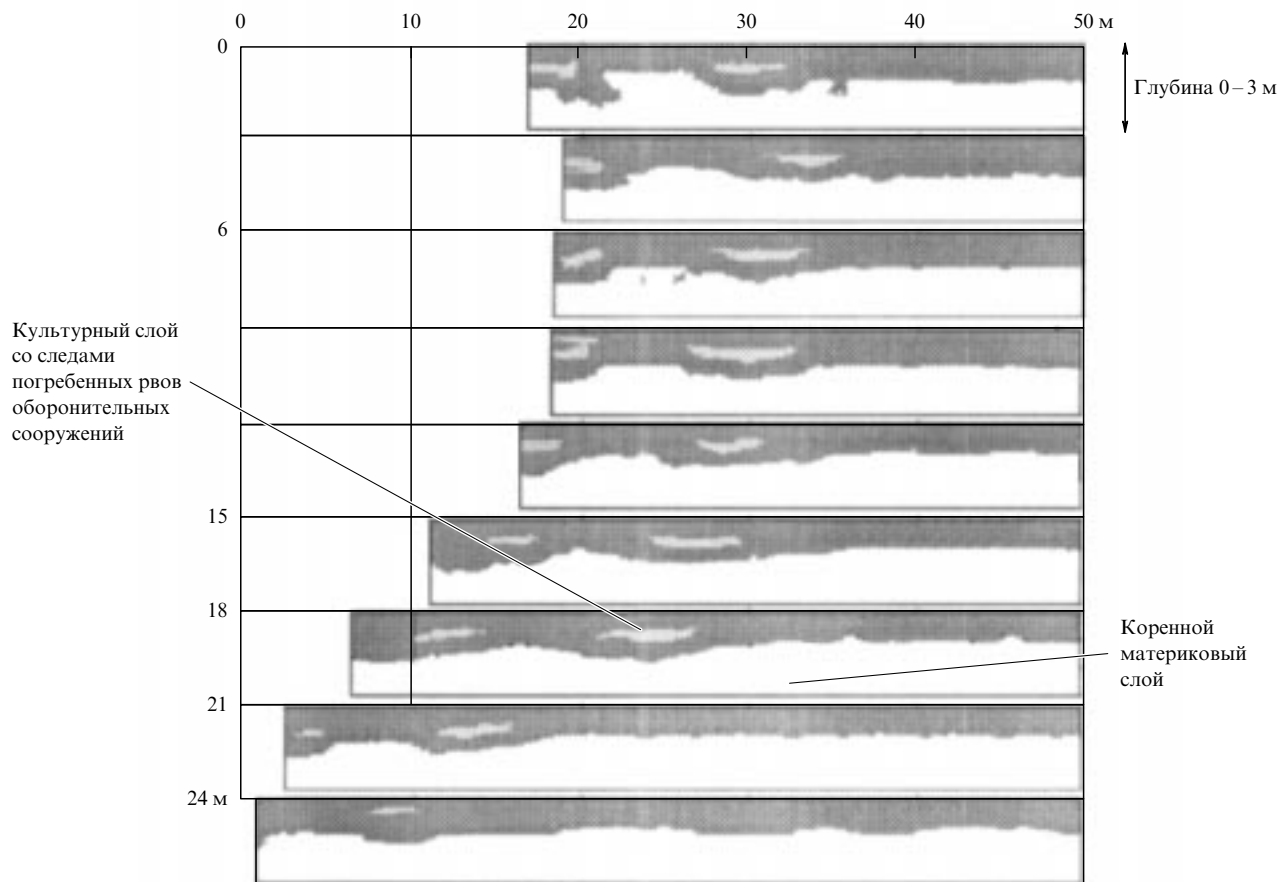


Рис. 2. Результаты георадарного обследования территории вокруг раскопок (4–3 век до н.э.) городища Настасьино, Коломенский р-н, Московская обл.

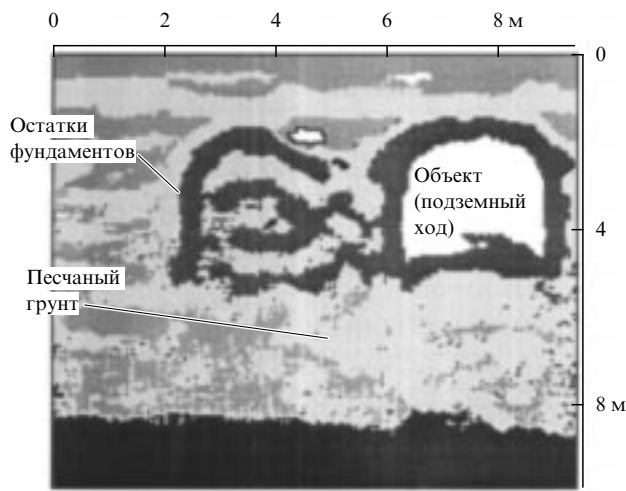


Рис. 3. Георадарный разрез структуры грунта на территории Александровского кремля.

Далее, используя аппарат современного вариационного исчисления, реализуется стратегия подгонки параметров среды с целью минимизации расхождения (невязки) между смоделированным и наблюдаемым сигналом. Для обеспечения сходимости итерационного процесса и единственности решения, минимизация рассматривается в определенных классах сред. Результатом решения обратной задачи является откорректированная модель среды (в выбранном классе), для которой смоделированный отклик среды имеет минимальное расхождение с наблюдаемым сигналом [7].

4. Опыт практической работы

Практическая работа по георадарному обследованию подземных структур носит регулярный характер. Всего, менее чем за два года, обследовано 140 объектов, связанных с провалами и строительством в условиях сложной системы подземных коммуникаций.

В качестве иллюстрации приведем три результата наших работ (рис. 1–3).

1. Георадарный разрез структуры грунта в области провала на ул. Большая Дмитровка в Москве. Причина аварии состоит в том, что геологический проект, разработанный по данным бурения, не учитывал аномального понижения границы юрских глин. (По заказу ОАО "МКНТ".)

2. Результаты георадарного обследования территории вокруг раскопок (ранний железный век, 4–3 век до н.э.) городища Настасьино, Коломенский р-н, Московская обл. По результатам обследования составлена карта культурного слоя с границами погребенных рвов фортификационных сооружений городища. (По заказу отдела охранных работ Института археологии РАН.)

3. Георадарный разрез структуры грунта на территории Александровского кремля (г. Александров, Владимирская обл.). Обнаружены и картированы "объекты" по "радиолокационному образу", подобные сводчатому подземному ходу или протяженному подвалу. По предварительному заключению историков музея-заповедника есть основания полагать, что эти "объекты" относятся к эпохе Ивана Грозного. (По заказу дирекции историко-архитектурного музея-заповедника "Александровская Слобода".)

5. Заключение

К настоящему времени приобретен опыт успешной эксплуатации в различных регионах России, включая Сибирь, Якутию и Дальний Восток. Практические результаты показывают, что реальный потенциал разработанных георадаров достаточен для решения многих задач в первых десяти метрах подповерхностного слоя даже в условиях глинистых почв Подмосковья.

Однако существуют задачи зондирования на сотни метров, которые также можно решать с помощью радиолокационного метода. Для того чтобы достичь таких глубин, необходимы радары частотного диапазона 1–50 МГц.

В ИЗМИРАН проводятся исследования в этой области и уже есть положительный практический опыт по зондированию геологических структур глубже 100 м.

Одной из основных причин, препятствующих широкому распространению георадарных технологий, является сложность интерпретации данных, требующая на современном этапе привлечения высококвалифицированных специалистов. Выход из этого положения заключается в создании математического аппарата решения обратной задачи радиолокационного зондирования, которая позволит минимизировать участие оператора в получении конечного результата, а также извлекать максимальное количество информации из георадарных данных.

Список литературы

1. Финкельштейн М И, Мендельсон В Л, Кутев В А *Радиолокация слоистых земных покровов* (М.: Сов. радио, 1977)
2. Evans S *Polar Rec.* **11** 406 (1963)
3. Cook J S *Geophys.* **40** 865 (1975)
4. *Подповерхностная радиолокация* (Под ред. М И Финкельштейна) (М.: Радио и связь, 1994)
5. Klimov S I et al. *Adv. Space Res.* **10** 35 (1990)
6. Гарбацевич В А, Копейкин В В, Кюн С Е, Щекотов А Ю "Устройство для радиолокационного зондирования подстилающей поверхности" Патент РФ от 15 февраля 1994 г.
7. Kerimov A, Kopeikin V, in *Proc. of 7th Intern. Conference on GPR* (Lawrence) Vol. 1 (1998) p. 309