
Активное и пассивное радиовидение

УДК 550.837.76; 537.86

Глубинный георадар: принципы и применение

© Авторы, 2018

© ООО «Издательство «Радиотехника», 2018

А.В. Попов – д.ф.-м.н., гл. науч. сотрудник, Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (г. Троицк, Моск. обл.)

E-mail: popov@izmiran.ru

И.В. Прокопович – науч. сотрудник, Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (г. Троицк, Моск. обл.)

E-mail: prokop@izmiran.ru

Д.Е. Едемский – к.т.н., ст. науч. сотрудник, Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (г. Троицк, Моск. обл.)

E-mail: deedemsky@gmail.com

П.А. Морозов – к.ф.-м.н., ст. науч. сотрудник, Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (г. Троицк, Моск. обл.)

E-mail: pmoroz5@yandex.ru

А.И. Беркут – д.т.н., ген. директор ООО «Компания ВНИИСМИ» (Москва)

E-mail: lozaberk@yandex.ru

Изложены принципы повышения глубины зондирования, реализованные в серии георадаров «Лоза» и позволяющие использовать георадар для решения геологических задач. Приведены примеры глубинных радарограмм с характерными затянутыми низкочастотными отраженными сигналами. Рассмотрено приближенное решение одномерной задачи распространения радиоволн на основе метода связанных волн, являющееся эффективным инструментом для инженерной оценки диэлектрической проницаемости неоднородной подповерхностной среды. На модельных расчетах показано, что принимаемые низкочастотные сигналы объясняются частичными отражениями на градиентах подповерхностной среды. В рамках рассмотренного приближения получено решение обратной задачи.

Ключевые слова: георадар, глубинное зондирование, ВКБ-приближение, метод связанных волн.

We describe the principles of penetration depth enhancement implemented in Loza GPR series, allowing one to use GPR for the purpose of geological investigation. The examples of experimental deep GPR radargrams with specific protracted low-frequency reflections are given. An approximate solution of the 1D radio wave propagation problem, based on the coupled-wave method, is considered. It can serve as an efficient engineering tool for the estimation of the dielectric permittivity of the non-uniform subsurface medium. It was shown by model calculations that the received low-frequency signals can be explained by partial reflections from smooth gradients of the subsurface medium. In the framework of the applied approximation, an inverse problem solution is given.

Keywords: GPR, georadar, deep penetration radar, coupled WKB.

Ц е л ь р а б о т ы – рассмотреть способы повышения глубины зондирования, реализованные в серии георадаров «Лоза», позволяющие использовать георадар для решения геологических задач.

Основные идеи ГГР

Работы по георадиолокации (импульсному электромагнитному зондированию верхних слоев земной коры) начались в ИЗМИРАН с начала 1990-х годов в связи с планировавшейся космической экспедицией Марс-94, которая предполагала полет и посадку на поверхность Марса межпланетной автоматической станции. Основной задачей было достижение максимальной глубины проникновения при жестких ограничениях на размер и вес аппаратуры. Поскольку существующие модели георадара не удовлетворяли требуемым характеристикам, инженеры ИЗМИРАН предложили новое конструкторское решение, основанное на принципе накопления энергии сигнала не в приемнике, а в передающем тракте. Такая схема проще в технической реализации, а конструкция легче по весу и более устойчива к нестабильности сети

питания. Конденсатор, генерирующий импульс, заряжается до нескольких тысяч вольт через маломощный высоковольтный источник и замыкается через разрядник на резистивно нагруженную антенну. При таком конструктивном решении мощность передатчика выросла примерно в 10000 раз и составила 1 МВт, что позволило использовать простой и легкий приемник без стробоскопического накопления принимаемого сигнала. Это, как и ряд других схемных решений, позволило сконструировать прибор с характеристиками, удовлетворяющими условиям планировавшегося космического полета.

Продолжительный застой в российской космической программе не остановил разработку «марсианских» георадаров, оказавшихся весьма полезными в земных условиях. В результате этих работ был разработан ряд коммерческих глубинных георадаров (ГГР), выпускаемых партнерскими компаниями ИЗМИРАН. Отличительной особенностью ГГР является накопление энергии в одиночном высоковольтном излучаемом импульсе вместо обычно используемой стробоскопической обработки последовательности зондирующих импульсов для синтеза волновой формы принятого сигнала. Первые натурные испытания такой системы зондирования показали, что радарный потенциал составляет около 120 дБ, то есть она способна регистрировать подповерхностные отраженные сигналы, ослабленные в миллион раз [1]. Первый ГГР «Лоза-В», выпускаемый ООО «Компания ВНИИСМИ» [2], имел приемник с полосой частот 50...300 МГц, импульсный передатчик в 5 кВ и антенны с центральной частотой от 100 МГц до 300 МГц. Он обеспечивал глубину зондирования свыше 10 м [3] и мог работать даже на влажных глинистых почвах, недоступных для большинства коммерческих георадаров.

Наряду с георадаром «Лоза-В», который до сих пор выпускается и широко используется в гражданском строительстве и археологии, были разработаны новые модели ГГР, нацеленные на геологические задачи, требующие глубин зондирования порядка 100...200 м. Такие «низкочастотные» системы электромагнитного зондирования «Лоза-Н» отличаются от георадаров «Лоза-В» повышенной мощностью и смещенной в сторону низких частот полосой излучаемого импульса, что уменьшает его погонное затухание.

Приведем основные факторы, обеспечивающие высокие характеристики серии георадаров «Лоза».

1. *Передатчик.* Пиковая мощность передатчика доведена до физического предела и ограничивается только изолирующими свойствами окружающей среды (грунт и воздух). Зондирующий импульс формируется путем плавной зарядки конденсатора и последующей быстрой его разрядки на резистивно-нагруженную антенну через высоковольтный водородный ключ. Характеристики зондирующего импульса (мощность, продолжительность и форма) зависят от электрических свойств подстилающей поверхности и параметров антенны. Поэтому, строго говоря, напряжение на конденсаторе является единственным стабильным параметром, которым можно описать конкретную модификацию передатчика. Георадар «Лоза-Н» комплектуется серийными передатчиками с напряжением 5, 10, 15, 21 кВ. Мощность самого слабого из них оценивается в 1 МВт в импульсе. Такие передатчики могут работать практически в любых погодных условиях и не создают помех радио- и телевидению благодаря очень короткой длительности импульса. В определенных условиях могут использоваться специальные передатчики с более высоким напряжением импульса.

2. *Антенны.* Чтобы создать короткий сверхширокополосный импульс, передающая антенна должна иметь нерезонансный характер (то же касается и приемной антенны, чтобы избежать паразитного «звона» в электрическом тракте приемника). Все антенны георадаров «Лоза» изготовлены по схеме распределенной резистивной нагрузки Ву-Кинга [4]: дополнительное поглощение вводится путем включения постепенно увеличивающихся сопротивлений между элементами линейной антенны.

3. *Волновая форма импульса.* Идеальный зондирующий сигнал должен иметь неосциллирующий характер. Благодаря резистивной нагрузке антенны ГГР «Лоза» создают сверхширокополосные импульсы, приближающиеся к этому идеалу, а их низкая добротность компенсируется большой энергией импульса тока.

4. *Полоса частот.* Хорошо известно, что затухание зондирующего сигнала в грунте зависит от частоты – чем выше частота зондирующего сигнала, тем меньше глубина проникновения. Для достижения максимальных глубин в георадарах «Лоза-Н» максимум энергии зондирующего импульса сдвинут на более низкие частоты в пределах полосы частот приемника георадара 1...50 МГц. Серийный георадар «Лоза-Н» комплектуется антеннами с центральной частотой 50 МГц (длина 3 м), 25 МГц (6 м), 15 МГц (10 м) и 10 МГц (15 м), выполненными в виде резистивно нагруженных полуволновых диполей на прочной нейлоновой основе (рис. 1).



Рис. 1. Низкочастотные (10 м) антенны ГГР «Лоза-Н» в тандемной конфигурации. Пустыня Наска (Перу) 2012 г.

5. *Оцифровка сигнала.* Для того, чтобы сохранить результаты глубинного георадарного зондирования мощным импульсным передатчиком с низкочастотными антеннами, необходимо корректно оцифровывать сигнал в динамическом диапазоне 120 дБ с частотой дискретизации 0,5...1 ГГц. Центральный процессор георадара «Лоза-Н» регистрирует 256 уровней амплитуды с помощью группы параллельных быстродействующих компараторов. Изменяя ослабление на аттенюаторах перед группой параллельных компараторов и многократно повторяя измерения, приемник георадара «Лоза» получает 256-пороговое представление волновой формы сигнала. Значения ослабления входного сигнала (начиная с «0») устанавливаются процессором в логарифмическом масштабе. Измеренные пороговые значения сохраняются и позволяют восстановить форму принятого сигнала. Таким образом, в коротком измерительном цикле полная волновая форма сигнала оцифровывается и записывается в оперативной памяти георадара.

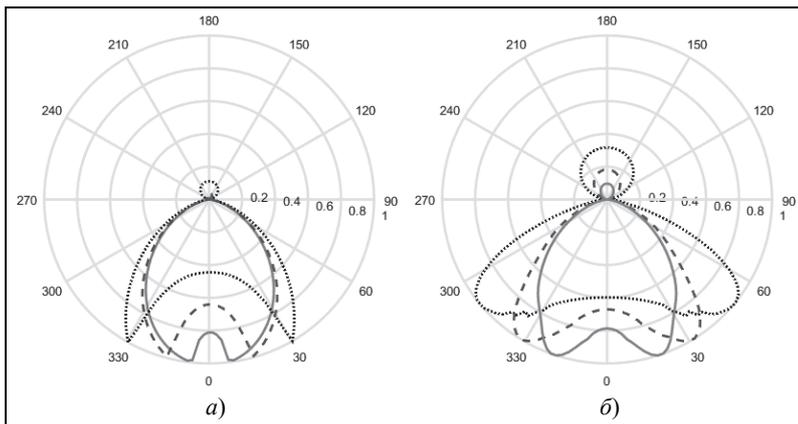


Рис. 2. Диаграмма направленности гармонического излучения бесконечной дипольной антенны на границе двух сред (а) и диаграмма импульсного излучения, рассчитанная на расстоянии $2l$ от передающей антенны (б). Стиль линий соответствует различным значениям показателя преломления $n = 2$ (···); 4 (- - -); 9 (—).

диаграмма излучения имеет два максимума, отстоящие от вертикали на угол полного внутреннего отражения $\eta = \arcsin(1/n)$ (рис. 2,а). Как показано в работе [6], этот эффект качественно сохраняется и в случае моноимпульсного георадарного зондирования. Пик диаграммы излучения здесь также имеет два максимума (более сглаженных), угол которых определяется свойствами подстилающей среды (рис. 2,б). В данном модельном примере (рис. 2,б) в качестве импульса тока, возбуждаемого в антенне, бралась функция $I(s) = \sin(\pi s/l) \exp(-s/l)$, где $s = ct$ – время в единицах длины, а l – характерная длина импульса.

Экспериментальные результаты

Все указанные выше принципы были реализованы в аппаратуре и методологии георадара «Лоза-Н». В результате первые сотни метров подповерхностной среды стали доступными для георадарного зондирования. Первый пример на рис. 3 демонстрирует четкий сигнал, возникший при отражении от туннеля, проложенного на глубине 50 м. Георадарные разрезы («Б»-сканы) позволяют с высокой точностью оце-

6. *Естественная фокусировка сигнала.* Диаграмма направленности линейных антенн в большой степени определяется грунтом, на котором размещены антенны. Излучение гармонических волн бесконечной линейной антенной, расположенной на границе диэлектрического полупространства, было рассмотрено в классической работе [5]. Показано, что формируется характерная двуроговая диаграмма излучения, ориентированная в сторону среды с большей диэлектрической проницаемостью. По оценкам [5], такая антенна излучает в грунт в n^2 раз больше энергии, чем в верхнюю полусферу (в воздух) (где n – показатель преломления грунта), а

нить диэлектрическую проницаемость грунта и глубину туннеля.

Рис. 4 иллюстрирует новый тип данных, встречающийся при георадарном зондировании плавно-слоистой подповерхностной среды. «А»-сканы в нижней части рисунка демонстрируют резкий переход от гладких однополярных эхосигналов с глубины порядка 100 м (сканы 1 и 2) к сильному отражению противоположного знака (скан 4). Интерпретация отдельных «А»-сканов нетривиальна (попытка их количественного описания сделана ниже). Однако «Б»-скан, составленный из одиночных отраженных сигналов (верхняя часть рис. 4) выявляет очевидную геологическую аномалию. Инженеры-практики разработали эффективные методы визуализации значимых особенностей подповерхностной среды (контрастные цветовые палитры, изолинии выделенных значений амплитуды или ее градиента, и т.п.).

Такое представление экспериментального материала позволяют опытному пользователю обнаруживать и локализовать полезные или опасные геологические или рукотворные структуры (рудные тела,

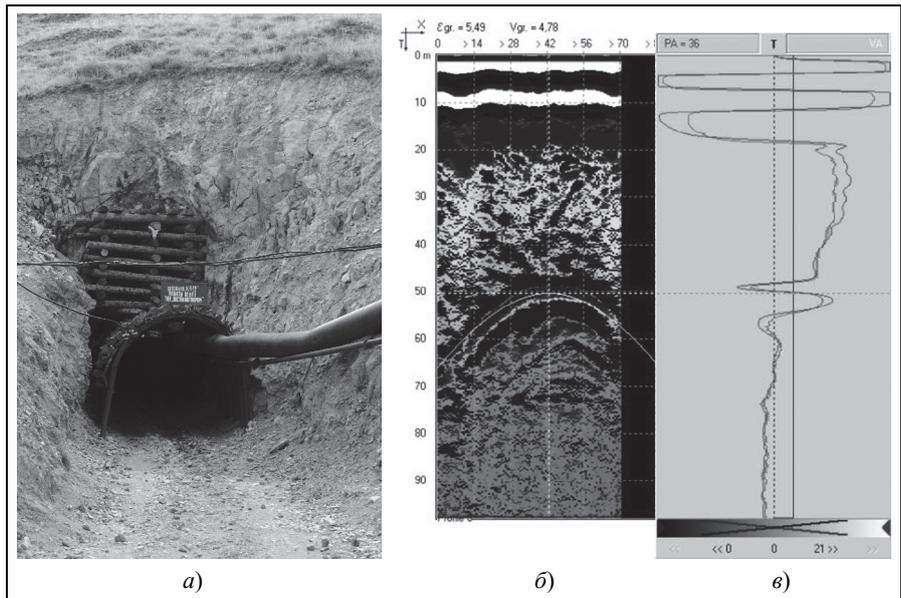


Рис. 3. Фото входа в туннель заброшенной шахты (Казахстан, 2010) (а), соответствующий глубинный георадарный разрез («Б»-скан) (б) и отдельная волновая форма сигнала («А»-скан) (в)

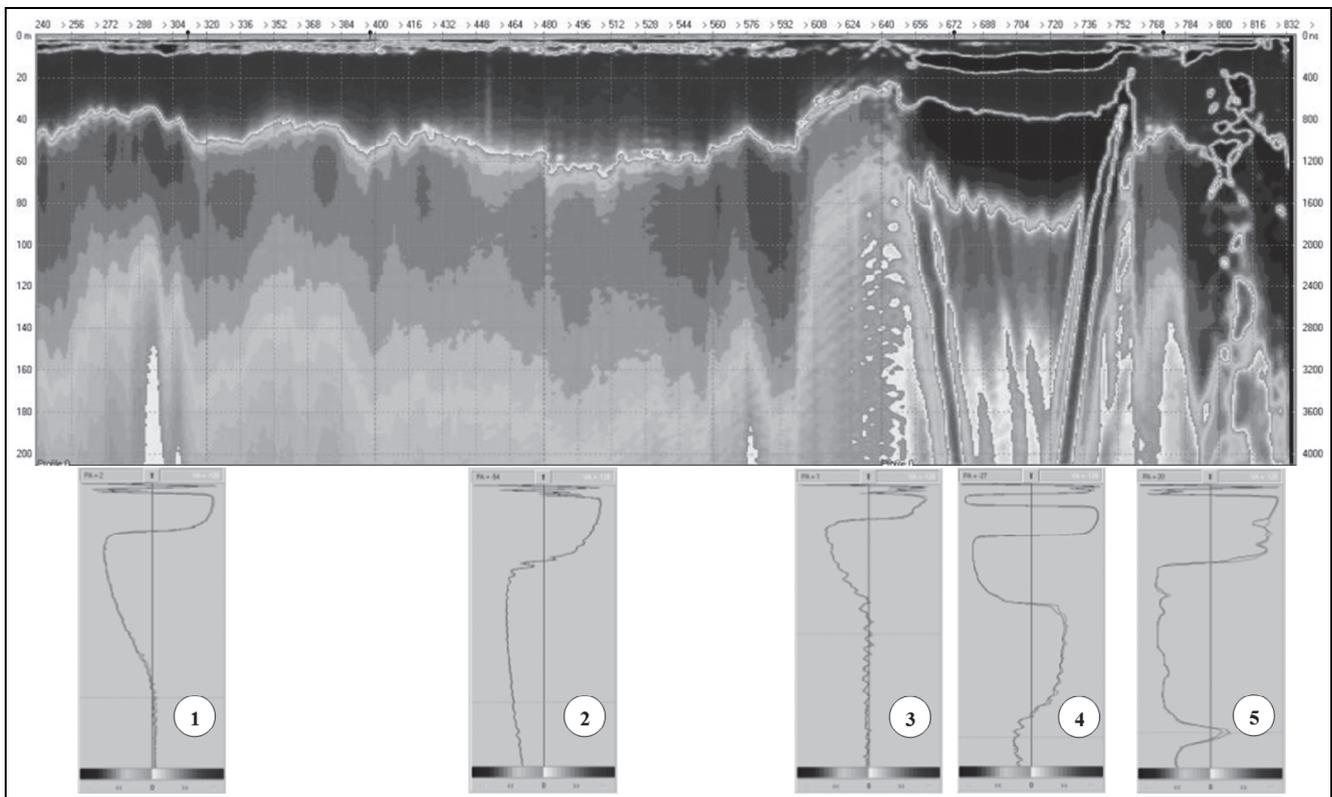


Рис. 4. Карстовый провал (Чехия, 2013): «Б»-скан от «Лоза-Н» (вверху) и избранные «А»-сканы на отметках 210 м, 480 м, 630 м, 704 м и 790 м (внизу)

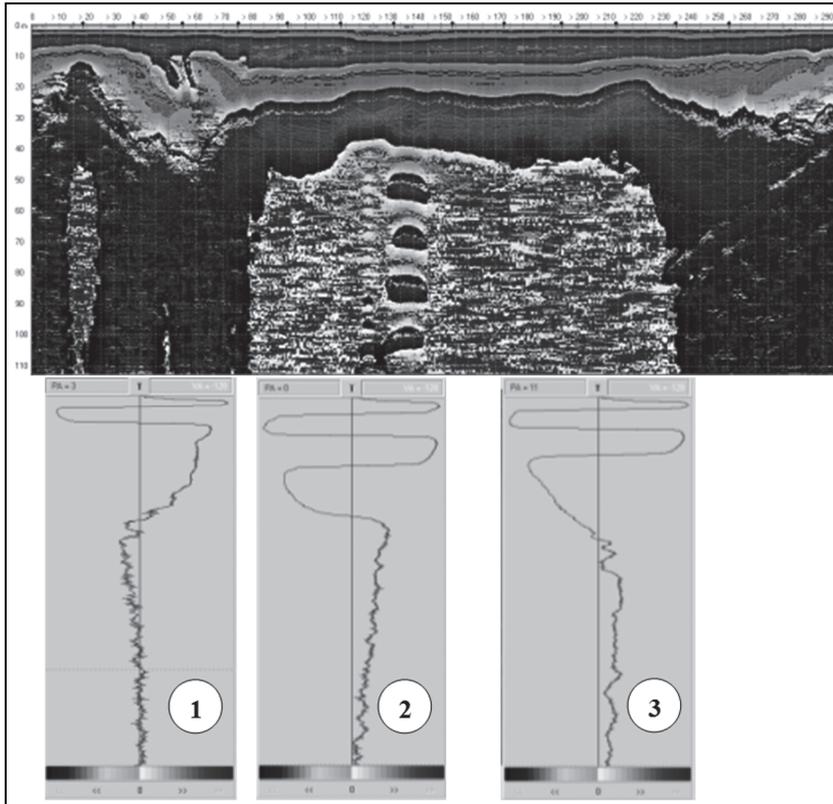


Рис. 5. Медное рудное тело (Казахстан, 2010): «Б»-скан от «Лоза-Н» (вверху); избранные «А»-сканы на отметках 40 м, 120 м и 220 м (внизу)

карстовые полости, оползни, туннели и т.п.). Пример успешного обнаружения медного рудного тела дан на рис. 5.

Физическая теория глубинных радарных эхосигналов

Все экспериментальные радарограммы, приведенные выше, построены в квазилогарифмической шкале $\text{Arsh}(E/E_0)$, чтобы отразить слабые эхосигналы, приходящие от глубоких слоев грунта. Количественное описание таких слабых отражений в 120 дБ динамическом диапазоне георадара «Лоза-Н» представляет серьезные трудности для обычно используемых вычислительных программ, таких как *grgMax* [7]. В то же время практика глубинного георадарного зондирования остро нуждается в качественном понимании для хотя бы грубой оценки особенностей подповерхностной среды. Прежде все-

го возникает вопрос о природе затянутых однополярных импульсов, приходящих с глубин 100...200 м. Среди пользователей глубинного георадара имеют хождение два мнения: 1) они связаны с проводимостью почвы; 2) они возникают как частичные отражения от градиентов подповерхностной среды. Численное моделирование подтверждает, что возможны оба механизма. Принимая во внимание геометрию глубинного зондирования, можно пренебречь разносом передающей и приемной антенн и в грубом приближении использовать одномерную модель вертикального распространения зондирующего сигнала.

Качественная теория одномерного распространения в горизонтально-слоистых диэлектрических средах на основе модифицированного ВКБ-приближения была разработана в предыдущей работе авторов [8]. Распространяя классический результат Бреммера–Бреховских на нестационарные волновые задачи, получаем в замкнутом виде решение для радарного отклика, возникающего за счет частичных отражений начального электромагнитного импульса $f(ct)$ от плавно-неоднородного профиля диэлектрической проницаемости $\varepsilon(z)$:

$$g(s) = -\frac{1}{4} \int_0^{Z(s)} \frac{\varepsilon'(z)}{\varepsilon(z)} f \left[s - 2 \int_0^z \sqrt{\varepsilon(\zeta)} d\zeta \right] dz. \quad (1)$$

Эта формула имеет очевидный физический смысл: начальный импульс распространяется в глубь среды от земной поверхности $z = 0$ по законам геометрической оптики до уровня виртуального отражения z , отражается от градиента и возвращается назад, проделав оптический путь $2 \int_0^z \sqrt{\varepsilon(\zeta)} d\zeta$. Для простоты пренебрегаем электрическими потерями и расходимостью волн, что может быть легко учтено в дальнейшем.

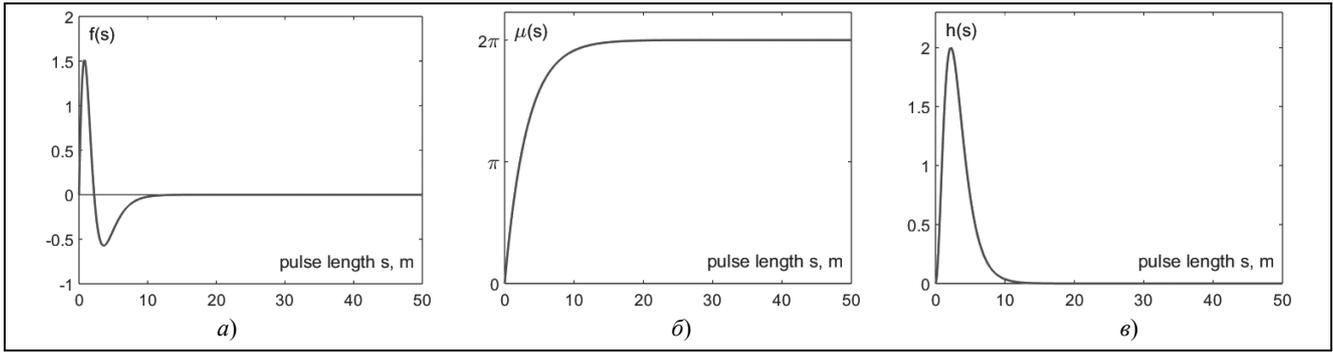


Рис. 6. Вид модельного зондирующего сигнала $f(s) = \mu'(s)\sin \mu(s)$ (а), его аргумент $\mu(s)$ (б) и интеграл $h(s) = \int_0^s f(r)dr$ (в)

Несмотря на то, что интегральное представление (1) имеет ясный физический смысл, оно все еще является слишком сложным для интерпретации экспериментальных данных: инженерам нужны элементарные средства для понимания природы максимумов сигнала, перемен знака и т.д. Кроме того, для численного расчета интеграла (1) может потребоваться вычислительное время, сравнимое с конечно-разностным методом интегрирования волнового уравнения. Чтобы получить простые формулы для практических целей, используем асимптотический анализ, основанный на предположении, что длина зондирующего сигнала мала по сравнению с характерным масштабом неоднородности подповерхностной среды. Определим форму начального импульса выражением $f(s) = \mu'(s)\sin \mu(s)$, $s = ct$. Если $\mu(s)$ – монотонная функция с предельными значениями $\mu(0) = 0$ и $\mu(\infty) = 2\pi$, например, $\mu(s) = 2\pi(1 - e^{-as})$, то рассматриваемая модель удовлетворяет физическим требованиям $f(0) = f(\infty) = 0$, $\int_0^\infty f(s)ds = 0$. Предположим, что $f(s)$ является производной от некоторой функции с единственным максимумом $f(s) = \frac{d}{ds}h(s)$ (в данном примере $h(s) = 1 - \cos \mu(s)$, рис. 6). Выполняя интегрирование по частям, имеем

$$g(s) = -\frac{1}{8} \int_0^{z^+(s)} \left(\frac{\varepsilon'(z)}{\varepsilon^{3/2}(z)} \right)' h[s - 2p(z)] dz, \tag{2}$$

где $p(z) = \int_0^z \sqrt{\varepsilon(\zeta)} d\zeta$ – оптический путь от передатчика до виртуального отражающего слоя.

Для короткого начального импульса интеграл (2) определяется узкой окрестностью острого максимума подынтегрального выражения $s - 2p(z) = (\log 2)/a \equiv l$, так что можно получить искомую оценку, вынося медленно меняющиеся функции из-под знака интегрирования:

$$g(s) = -\frac{1}{8} \left[\varepsilon^{-1/2} \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon^{3/2}} \right)' \right]_{z=z_m(s)} \int_0^{z^+(s)} h[s - 2p(z)] p'(z) dz. \tag{3}$$

В этом выражении свойства среды и зондирующего импульса разделены. Последний интеграл зависит только от формы импульса и может быть легко вычислен:

$$I(s) = \int_0^{s/2} h(s - 2p) dp = \frac{1}{2a} \int_{2\pi \exp(-as)}^{2\pi} \frac{1 - \cos \mu}{\mu} d\mu,$$

а первый множитель определяется профилем диэлектрической проницаемости грунта $\varepsilon(z)$:

$$\varepsilon^{-1/2} \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon^{3/2}} \right)' \Big|_{z=z_m(s)} = \frac{\varepsilon''(z_m)}{\varepsilon^2(z_m)} - \frac{3}{2} \frac{\varepsilon'^2(z_m)}{\varepsilon^3(z_m)} \equiv \Phi(s). \tag{4}$$

Как было указано ранее, $z_m(s)$ – это глубина, соответствующая удвоенному времени распространения $t = s/c$ максимума зондирующего импульса:

$$s = l + 2p(z_m) = l + 2 \int_0^{z_m} \sqrt{\varepsilon(\xi)} d\xi. \quad (5)$$

Несмотря на элементарный характер формул (4) и (5), интерпретация формы импульса, принимаемого глубинным георадаром, не очевидна. Однако соотношение (4) можно рассматривать как дифференциальное уравнение с правой частью $\Phi(s) = -8 \frac{g(s)}{I(s)}$, определяемой из эксперимента. Покажем, что его можно легко решить относительно функции $\varepsilon(z)$. Действительно, сделав замену независимой переменной согласно соотношению $ds = 2\sqrt{\varepsilon(z_m)} dz_m$ и обозначив $\varepsilon(z_m) = \varepsilon_0 \exp[V(s)]$, получаем линейное дифференциальное уравнение $\dot{V}(s) = \frac{1}{4}\Phi(s)$, которое имеет точное решение

$$V(s) = \frac{1}{4} \left[\int_{s_0}^s \Phi(r)(s_0 - r) dr + (s_0 - s) \int_s^\infty \Phi(r) dr \right]$$

при граничных условиях $V(s_0) = 0$, $\dot{V}(\infty) = 0$. Формулы $\varepsilon = \varepsilon_0 \exp[V(s)]$ и $z = z_0 + \frac{1}{2\sqrt{\varepsilon_0}} \int_{s_0}^s \exp[-0,5V(s)] ds$

определяют параметрическое решение $\varepsilon(z)$, обеспечивающее удовлетворительную точность при минимальном объеме вычислений.

Точность приближения связанных волн ВКБ была проверена в работе [8] на ряде модельных примеров. Асимптотическое решение (3) обеспечивает сопоставимую точность, но может быть вычислено за секунды.

Конечно, чтобы превратить это упрощенное решение обратной задачи в надежный алгоритм обработки реальных данных глубинного радиозондирования, надо учесть еще ряд факторов, таких как диаграмма направленности антенны, расходимость зондирующего импульса, материальные потери и др. Тем не менее, даже в такой урезанной форме приближение связанных волн может быть весьма полезным для качественной оценки свойств подповерхностной среды из экспериментальных радарограмм.

Приведем два модельных примера для иллюстрации соответствия между характерными точками профиля диэлектрической проницаемости и формой затянутого отраженного сигнала.

Первый пример соответствует плавному переходу между двумя однородными слоями с диэлектрической проницаемостью ε_0 и ε_1 : $\varepsilon(z) = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_1}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{2z - z_0 - z_1}{6(z_1 - z_0)} \right]$ (рис. 7,а). Значения параметров:

$\varepsilon_0 = 4$, $\varepsilon_1 = 7$, $z_0 = 10$, $z_1 = 60$ близки к характерным свойствам переходного слоя между сухим песком и влажной известняковой подложкой (рис. 4). Профиль диэлектрической проницаемости изображен на рис. 7,а, а рассчитанный принятый сигнал глубинного георадара показан на рис. 7,б (штриховая линия). Чтобы учесть материальные потери в среде, введено небольшое затухание $\exp(-0,01s)$ (сплошная линия). Узкий пик в левой части рисунка соответствует короткому (18 нс) начальному импульсу $f(ct)$ (см. рис. 6) (длина импульса в вакууме $l = 5$ м). Затянутый биполярный сигнал $g(s)$ в средней части графика является результатом частичных отражений от градиентов переходного слоя. В этой реалистической модели его амплитуда порядка 10^{-4} от величины начального импульса. Для того чтобы изобразить такую большую разницу, используется нелинейная шкала $\operatorname{Arsh}(E/E_0)$ с $E_0 \sim 10^{-8}$ (аналогичное представление данных используется в георадарах «Лоза»). Сравнение с волновой формой реального сигнала – «А»-скан (кривая I на рис. 4) – показывает отличное качественное соответствие.

Другой пример плавной неоднородности подповерхностной среды приведен на рис. 7,г и д. Это плавный горб $\varepsilon_1 = 7$ на уровне $\varepsilon_0 = \varepsilon_\infty = 4$ на графике диэлектрической проницаемости, описываемомся

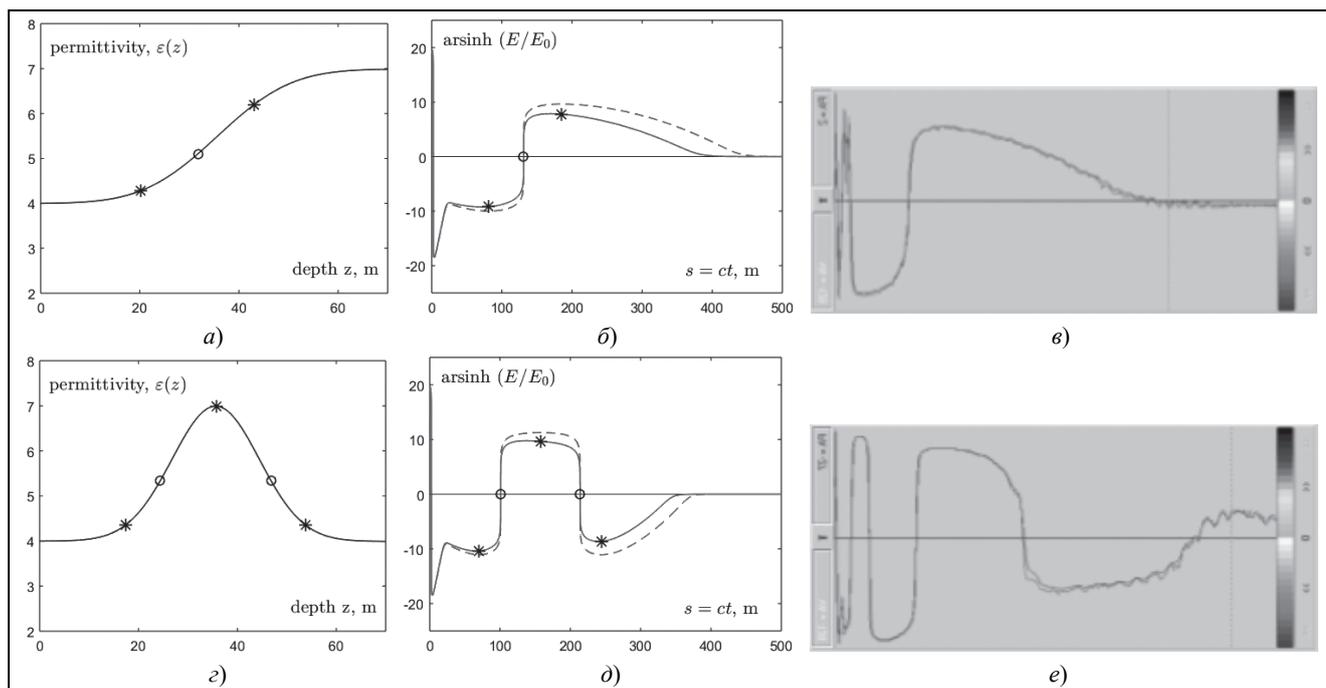


Рис. 7. Модельные профили диэлектрической проницаемости $\varepsilon(z)$ с характерными точками (* – максимумы кривизны, \circ – точки перегиба) (а, с), вид принятого сигнала $E = f(s) + g(s)$ в квазилогарифмической шкале с теми же отметками для среды без поглощения (---) и с затуханием $e^{-0.01s}$ (—) (б, д) и экспериментальные «А»-сканы (1) и (4) из георадарного профиля на рис. 4 (е, е)

гауссоидой $\varepsilon(z) = \varepsilon_0 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_0) \exp \left[- \left(z - \frac{z_0 + z_1}{2} \right)^2 / \left(\frac{z_1 - z_0}{4} \right)^2 \right]$ с теми же параметрами $\varepsilon_0 = 4$, $\varepsilon_1 = 7$,

$z_0 = 10$, $z_1 = 60$. В этом случае затянутый отраженный сигнал имеет две точки перемены знака. Это напоминает «А»-скан (4) экспериментального графика на рис. 4, снятый на участке немонотонного изменения диэлектрических свойств грунта, возникшего в результате карстового провала. В обоих случаях характерные точки отраженного сигнала могут быть сопоставлены с особенностями профиля диэлектрической проницаемости $\varepsilon(z)$: его максимумы и минимумы, отмеченные звездочкой, соответствуют уровням максимальной кривизны профиля, в то время как отмеченные кружками точки перехода через ноль (смена знака отраженного сигнала) указывают на точки уплощения профиля $\varepsilon(z)$.

- Новые принципы, заложенные в конструкцию георадаров «Лоза-Н», обеспечивают глубину зондирования 100...200 м. Особенности слабых эхосигналов, приходящих с этих глубин, могут быть объяснены с помощью нестационарного варианта метода связанных волн ВКБ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-02-00185.

Литература

1. Kopeikin V.V., Edemsky D.E., / Garbatsevich V.A., Popov A.V., Reznikov A.E., Schekotov A.Yu. Enhanced power ground penetrating radars // Proc. 6th Internat. Conf. on GPR. Sendai (Japan). 1996. P. 152–154.
2. <http://www.geo-radar.ru/> (дата обращения 20.02.2018).
3. Kopeikin V.V., Krashenninnikov I.V., Morozov P.A., Popov A.V., Guangyou Fang, Xiaojun Liu, Bin Zhou. Experimental verification of LOZA-V GPR penetration depth and signal quality // Proc. of 4th Internat. Workshop on Advanced GPR. Naples (Italy). 2007. P. 230–233.
4. Wu T.T., King R.W.P. The cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading // IEEE Trans. Antennas Propag. 1965. V. 13. № 3. P. 369–373.
5. Engheta N., Papas C.H., Elachi C. Interface extinction and subsurface peaking of the radiation pattern of a line source // Applied Physics B. 1981. V. 26. № 4. P. 231–238.
6. Edemsky F., Popov A., Zapunidi S. A time domain model of GPR antenna radiation pattern // Internat. Journ. of Electronics and Telecommunications. 2011. V. 57. № 3. P. 407–411.

7. *Giannopoulos A.* Modelling ground penetrating radar by GprMax // Construction and Building Materials. 2005. V. 19. P. 755–762.
8. *Vinogradov V.A., Kopeikin V.V., Popov A.V.* An approximate solution of 1D inverse problem // Proc. 10th Internat. Conf. on GPR. Delft (The Netherlands). 2004. P. 95–98.

Поступила 29 марта 2018 г.

Deep penetration subsurface radar: principles and application

© Authors, 2018

© Radiotekhnika, 2018

A.V. Popov – Dr.Sc.(Phys.-Math.), Main Research Scientist, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS

E-mail: popov@izmiran.ru

I.V. Prokopovich – Research Scientist, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS

E-mail: prokop@izmiran.ru

D.E. Edemsky – Ph.D.(Eng.), Senior Research Scientist, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS

E-mail: deedemsky@gmail.com

P.A. Morozov – Ph.D.(Phys.-Math.), Senior Research Scientist, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS

E-mail: pmoroz5@yandex.ru

A.I. Berkut – Dr.Sc.(Eng.), General Director of JSC VNIISMI (Moscow)

E-mail: lozaberk@yandex.ru

A promising direction of GPR development is increasing its penetration depth in order to meet the needs of the upper crust geology in a 100–200 m subsurface layer. The ways to achieve deep penetration include increasing transmitter power, antennas efficiency, receiver sensitivity, as well as reducing the noise level. All these ideas have been implemented in a series of «Loza» enhanced-power subsurface radars designed at IZMIRAN and partner R&D company VNIISMI. The main distinctive feature of this deep penetrating radar (DPR) is energy accumulation in a single high-voltage transmitted pulse instead of received signal synthesis by repetitive stroboscopic processing. Another construction peculiarity is the use of resistively-loaded antennas, which allows one to come closer to creation of an ideal non-oscillating probing pulse. In order to reach maximum depths, the energy maximum in Loza-N DPR is shifted to the lower part of the receiver frequency band 1–50 MHz. As a result of this development, the first hundreds of meter of the underground medium became accessible for GPR survey. In this work, some experimental deep radargrams (B-scans and selected A-scans) are discussed. A special attention is paid to the protracted signals coming from the depths of 50–100 m. Practical experience of field engineers working with Loza-N DPR and comparative analysis of low-frequency radargrams together with check drilling reveal a reliable correlation between the sign of these weak return pulses with vertical gradients of the subsurface medium. The developed visualization methods allow an experienced user to detect and localize useful or dangerous geological or man-made subsurface structures (ore bodies, karst voids, landslides, tunnels, etc). In the last section, an asymptotic description of the probing pulse partial reflections from smooth permittivity gradients is derived to confirm these observations. Model examples demonstrate a remarkable similarity between the calculated and measured A-scans. Although approximate solutions of the quasi-monostatic GPR probing problem are known for a long time their implementation is usually restricted to a piecewise-uniform permittivity distribution. Backward reflections from a smooth transition layer may be exponentially small, which requires a big number of thin uniform layers and inadequately large computation time for their correct assessment. In this relation, our asymptotic solution has an advantage of simplicity and clear physical meaning necessary for qualitative understanding of the DPR field data.

References

1. *Kopeikin V.V., Edemsky D.E., Garbatsevich V.A., Popov A.V., Reznikov A.E., Schekotov A.Yu.* Enhanced power ground penetrating radars // Proc. 6th Internat. Conf. on GPR. Sendai (Japan). 1996. P. 152–154.
2. <http://www.geo-radar.ru/> (data obrashheniya 20.02.2018).
3. *Kopeikin V.V., Krashennnikov I.V., Morozov P.A., Popov A.V., Guangyou Fang, Xiaojun Liu, Bin Zhou.* Experimental verification of LOZA-V GPR penetration depth and signal quality // Proc. of 4th Internat. Workshop on Advanced GPR. Naples (Italy). 2007. P. 230–233.
4. *Wu T.T., King R.W.P.* The cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading // IEEE Trans. Antennas Propag. 1965. V. 13. № 3. P. 369–373.
5. *Engheta N., Papas C.H., Elachi C.* Interface extinction and subsurface peaking of the radiation pattern of a line source // Applied Physics B. 1981. V. 26. № 4. P. 231–238.
6. *Edemsky F., Popov A., Zapunidi S.* A time domain model of GPR antenna radiation pattern // Internat. Journ. of Electronics and Telecommunications. 2011. V. 57. № 3. P. 407–411.
7. *Giannopoulos A.* Modelling ground penetrating radar by GprMax // Construction and Building Materials. 2005. V. 19. P. 755–762.
8. *Vinogradov V.A., Kopeikin V.V., Popov A.V.* An approximate solution of 1D inverse problem // Proc. 10th Internat. Conf. on GPR. Delft (The Netherlands). 2004. P. 95–98.