

Глубинный георадар: аппаратура, результаты, интерпретация

А.И. Беркут
ООО «Компания ВНИИСМИ»
Москва, Россия
lozaberk@yandex.ru

Д.Е. Едемский, В.В. Копейкин, П.А. Морозов,
И.В. Прокопович, А.В. Попов
Институт земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Россия
popov@izmiran.ru

Аннотация: Излагаются принципы повышения глубины зондирования, реализованные в серии георадаров «Лоза», приводятся примеры глубинных радарограмм, дается приближенное решение обратной задачи на основе метода связанных волн.

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

I. ОСНОВНЫЕ ИДЕИ ГГР

Работы по георадиолокации (импульсному электромагнитному зондированию верхних слоев земной коры) начались в ИЗМИРАН с начала 90-х годов в связи с планировавшейся космической экспедицией Марс-94 (не реализованной). Основной задачей было достижение максимальной глубины проникновения при жестких ограничениях на размер и вес аппаратуры. Поскольку существующие модели георадара не удовлетворяли требуемым характеристикам, наши инженеры предложили новые конструкторские решения, позволившие на четыре порядка увеличить потенциал подповерхностного радара (отношение уровня мощности излучаемого сигнала к чувствительности приемника).

Продолжительный застой в российской космической программе не остановил разработку наших «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 «высокочастотный» ГГР «Лоза-В», выпускаемый ООО «Компания ВНИИСМИ» [2], имел 5 кВ импульсный передатчик и антенны с центральной частотой от 100 до 300 МГц. Он обеспечивал глубину зондирования свыше 10 метров [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 идеи, обеспечивающие высокие характеристики серии георадаров «Лоза»:

1) *Передатчик.* Повышение его пиковой мощности



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

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. Продолжительность и форма зондирующего импульса зависят от электрических свойств подстилающей поверхности и параметров антенны. Строго говоря, искровой передатчик характеризуется амплитудой и энергией отдельного излучаемого импульса, однако инженеры предпочитают говорить о его «мощности», которая составляет 5, 10, 15 и 21 кВ для серийных комплектов «Лоза-Н». 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 ГПР «Лоза» создают сверхширокополосные импульсы, приближающиеся к этому идеалу, а их низкая добротность компенсируется большой энергией импульса тока.

4) *Полоса частот.* Хорошо известно, что затухание импульса в грунте зависит от частоты – короткие импульсы обеспечивают неглубокое проникновение. Для достижения максимальной глубины зондирования максимум энергии импульса в георадарах «Лоза-Н» смещен в низкочастотную часть полосы приемника, 1-50 МГц. Серийный георадар «Лоза-Н» комплектуется антеннами с центральной частотой 50 МГц (длина 3 метра), 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.

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 входе, приемник «Лозы» получает 256-битное представление волновой формы принятого сигнала и записывает его в логарифмической шкале. Таким образом, в коротком измерительном цикле полная волновая форма сигнала оцифровывается и записывается в оперативной памяти георадара.

6) *Естественная фокусировка сигнала.* Гибкая основа антенны обеспечивает плотный контакт с грунтом, что приводит к естественной фокусировке волны в сторону грунта (среды с более высоким показателем преломления). При излучении с границы раздела гармоническая электромагнитная волна формирует характерную двурогую диаграмму, направленную в нижнее полупространство [5]. Как показано в нашей работе [6], этот эффект сохраняется и в случае моноимпульсного георадарного зондирования – Рис.2, что также увеличивает глубину зондирования.

II. 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 – Рис. 3 демонстрирует четкий сигнал, возникший при отражении от туннеля, проложенного на глубине 50 м. Георадарные разрезы («В-сканы») позволяют с высокой точностью оценить диэлектрическую проницаемость грунта и глубину туннеля.

Следующий рисунок (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 эхо-сигналов с глубины порядка 100 м (сканы 1-2) к сильному отражению противоположного знака (скан 4). Интерпретация отдельных А-сканов нетривиальна (попытка их

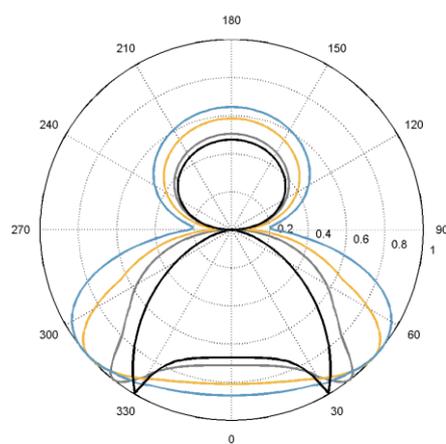


Рис. 2. Три последовательных угловых распределения амплитуд (голубая, желтая, серая линии) и диаграмма направленности излучения в дальней зоне (черная линия).

количественного описания сделана в разделе III), однако В-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.).

Такие невинные ухищрения позволяют опытному пользователю обнаруживать и локализовать полезные или опасные геологические или рукотворные структуры (рудные тела, карстовые полости, оползни, туннели и т.п.). Пример успешного обнаружения медного рудного тела дан на Рис. 5.



III. ФИЗИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГЛУБИННЫХ РАДАРНЫХ ЭХО-СИГНАЛОВ

Все экспериментальные радарограммы, приведенные в разделе II, построены в квазилогарифмической шкале $\text{Arsh}(E/E_0)$, чтобы отразить слабые эхо-сигналы, 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 и хотя бы грубой оценке особенностей подповерхностной среды. Прежде всего возникает вопрос о природе затяннутых однополярных импульсов, приходящих с глубин 100-200 м. Среди пользователей глубинного георадара имеют хождение два мнения: 1) они связаны с проводимостью почвы; или 2) возникают как частичные отражения от градиентов подповерхностной среды. Численное моделирование подтверждает, что возможны оба механизма. Принимая во внимание геометрию глубинного зондирования, можно пренебречь разномом 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 развита в нашей предыдущей работе [8]. Распространяя классический результат Бреммера-Бреховских на нестационарные волновые задачи, мы получаем в замкнутом виде решение для радарного отклика, возникающего за счет частичных отражений начального электромагнитного импульса $f(ct)$ от плавно-неоднородного профиля диэлектрической проницаемости $\varepsilon(z)$:

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

Эта формула имеет очевидный физический смысл: начальный импульс распространяется в глубь среды с земной поверхности $z=0$ по законам геометрической

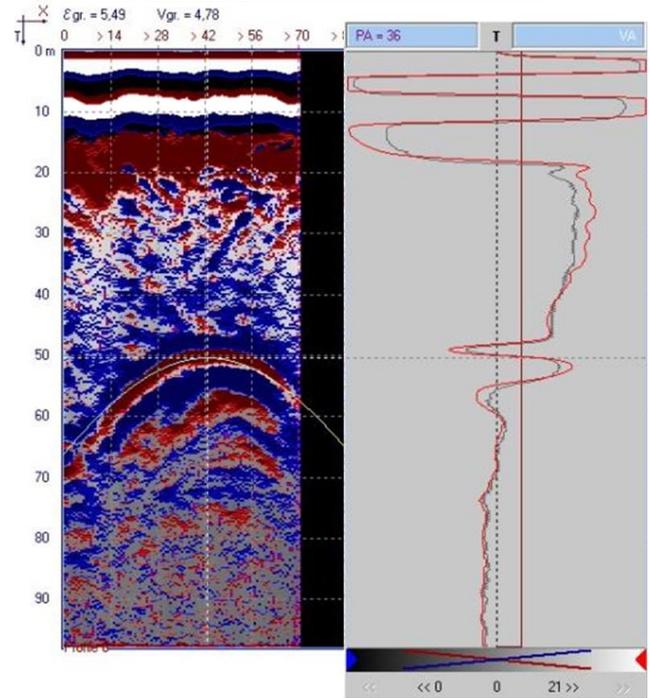


Рис. 3. Штольня заброшенной шахты (Казахстан, 2010). Верхний рисунок: вход в туннель; внизу слева: глубинный георадарный разрез (В-скан); справа: отдельная волновая форма сигнала (А-скан).

оптики до уровня виртуального отражения z , отражается от градиента $\varepsilon'(z)/\varepsilon(z)$ и возвращается назад, проделав оптический путь $2 \int_0^z \sqrt{\varepsilon(\zeta)} d\zeta$. Для простоты мы пренебрегаем электрическими потерями и расходимостью волн, что может быть легко учтено в дальнейшем.

Несмотря на то, что интегральное представление (1) имеет ясный физический смысл, оно все еще слишком сложно 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. Для того, чтобы получить простые формулы для практических целей, мы используем асимптотический

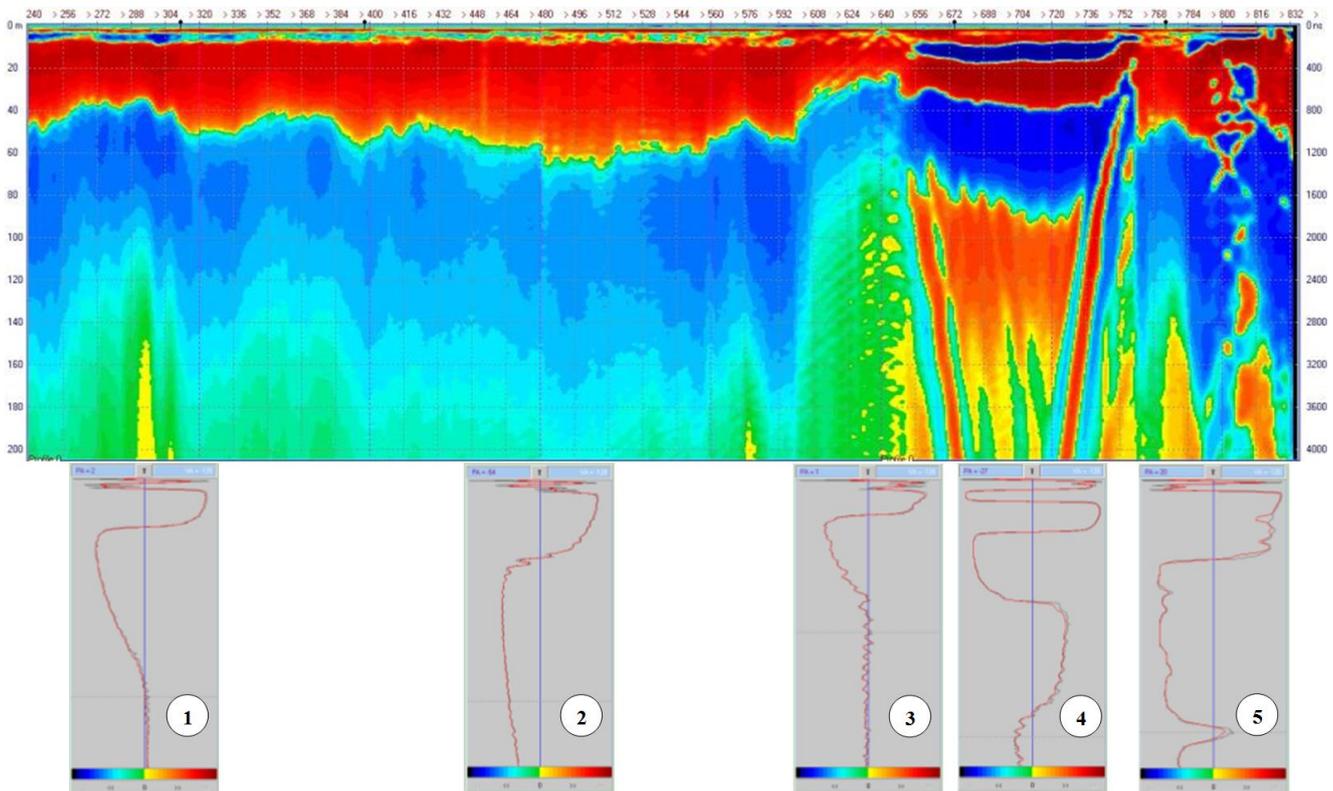


Рис. 4. Карстовый провал (Чехия, 2013). Вверху: В-скан («Лоза-Н»); внизу: избранные А-сканы на отметках 210 м, 480 м, 630 м, 704 м и 790 м.

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 $\mu(0) = 0$, $\mu(\infty) = 2\pi$,

например, $\mu(s) = 2\pi(1 - e^{-as})$, то наша модель удовлетворяет физическим требованиям $f(0) = f(\infty) = 0$, $\int_0^{\infty} f(s) ds$. Предположим, что $f(s)$ является производной от некоторой функции с единственным максимумом: $f(s) = \frac{d}{ds} h(s)$ в (нашем примере $h(s) = 1 - \cos \mu(s)$ – см.

Рис. 6). Выполнив интегрирование по частям, имеем

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

где $p(z) = \int_0^z \sqrt{\epsilon(\zeta)} d\zeta$ есть оптический путь от передатчика до виртуального отражающего слоя. Для короткого начального импульса интеграл (2) определяется узкой окрестностью острого максимума подынтегрального выражения $s - 2p(z) = \frac{\log 2}{a} \equiv l$, так что можно получить искомую оценку вынося медленно меняющиеся функции из-под знака интегрирования:

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

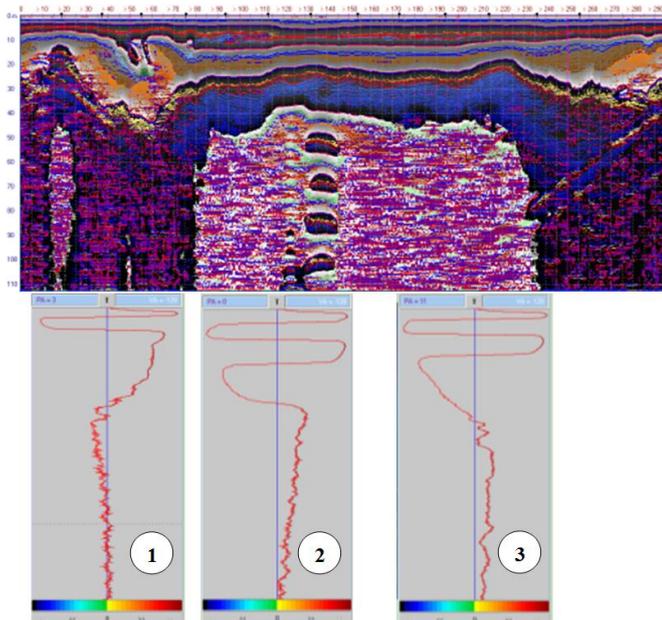


Рис. 5. Медное рудное тело (Казakhstan, 2019). Вверху: В-скан («Лоза-Н»); внизу: избранные А-сканы на отметках 40 м, 120 м и 220 м.

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

$$I(s) = \int_0^{s/2} h(s-2p)dp = \frac{1}{2a} \int_{2\pi \exp(-as)}^{2\pi} \frac{1-\cos \mu}{\mu} d\mu, \quad (4)$$

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

$$\varepsilon^{-1/2} \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon^{3/2}} \right)' \Big|_{z=z_m(s)} = \frac{\varepsilon''(z_m)}{\varepsilon^2(z_m)} - \frac{3}{2} \frac{\varepsilon'^2(z_m)}{\varepsilon^3(z_m)} \equiv \Phi(s). \quad (5)$$

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

$$s = l + 2p(z_m) = l + 2 \int_0^{z_m} \sqrt{\varepsilon(\xi)} d\xi. \quad (6)$$

Несмотря на элементарный характер формул (5) и (6), интерпретация формы импульса, принимаемого глубинным георадаром, не очевидна. Однако, соотношение (5) можно рассматривать как дифференциальное уравнение с правой частью

$$\Phi(s) = -8 \frac{g(s)}{I(s)} \quad (7)$$

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 $\varepsilon(z_m) = \varepsilon_0 \exp[V(s)]$, мы получаем линейное дифференциальное уравнение

$$\ddot{V}(s) = \frac{1}{4} \Phi(s). \quad (8)$$

Оно имеет точное решение

$$V(s) = \frac{1}{4} \int_0^s \Phi(r)(s-r) dr + Const \quad (9)$$

при соответствующих граничных условиях. Формулы

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \exp[V(s)], \quad z = \frac{1}{2\sqrt{\varepsilon_0}} \int_0^s \exp[-\frac{1}{2}V(s)] ds \quad (10)$$

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. Два модельных примера иллюстрируют соответствие 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 :

$$\varepsilon(z) = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_1}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{2} \operatorname{erf} \left[\left(\frac{2z - z_0 - z_1}{6} \right) / (z_1 - z_0) \right] - \text{Рис. 7а.}$$

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 – см. Рис.4. Профиль диэлектрической проницаемости изображен на Рис. 7а, а рассчитанный принятый сигнал глубинного георадара показан на Рис. 7б (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 $f(ct)$ – Рис. 6 (длина импульса в вакууме $l = 5$ м). Затянутый биполярный сигнал $g(s)$ в средней части графика является результатом частичных отражений от градиентов

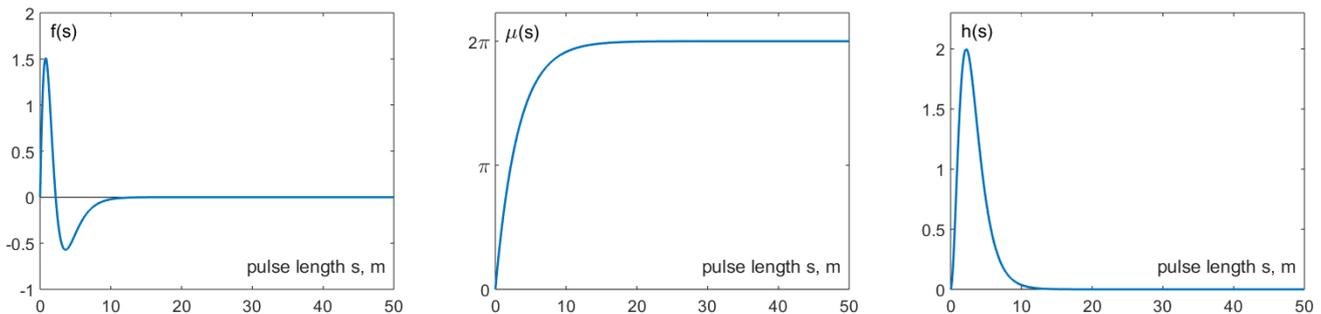


Рис. 6. Модельный зондирующий сигнал $f(s) = \mu'(s) \sin \mu(s)$, его аргумент $\mu(s)$ и интеграл $h(s)$.

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 $\text{Arsh}\left(\frac{E}{E_0}\right)$

уровням максимальной кривизны профиля, в то время как отмеченные кружками точки перехода через ноль (смена знака отраженного сигнала), указывают точки уплощения профиля $\varepsilon(z)$.

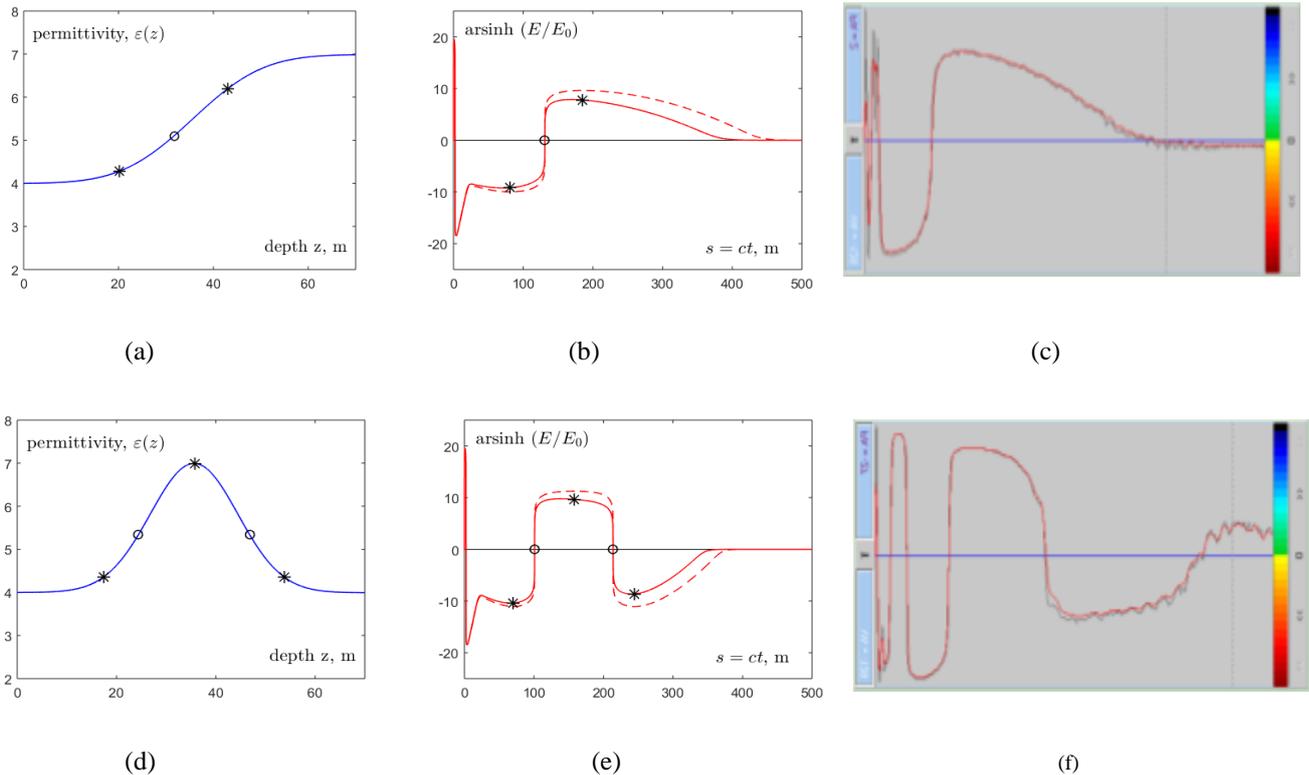


Рис. 7. (a, d) - модельные профили диэлектрической проницаемости $\varepsilon(z)$ с характерными точками (максимумы кривизны * и точки перегиба \circ). (b, e) - принятый сигнал $E = f(s) + g(s)$ в квазилогарифмической шкале с теми же отметками (среда без поглощения – штриховая линия, с затуханием $\exp(-0.01s)$ – сплошная линия); (c, f) – экспериментальные А-сканы (1) и (4) из георадарного профиля Рис. 4.

(аналогичное представление данных используется в георадарах «Лоза»). Сравнение с волновой формой реального сигнала - А-скан (1) на Рис. 4 - показывает отличное качественное соответствие. Другой пример плавной неоднородности подповерхностной среды приведен на Рис. 7(c, d). Это – плавный горб $\varepsilon_1 = 7$ на уровне $\varepsilon_0 = \varepsilon_\infty = 4$ на графике диэлектрической проницаемости, описываемом 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 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

IV.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] V.V. Kopeikin, D.E. Edemsky, V.A. Garbatsevich, A.V. Popov, A.E. Reznikov, A.Yu. Schekotov, "Enhanced Power Ground Penetrating Radars," *Proc. 6th Internat. Conf. on GPR*, Sendai, Japan, pp. 152-154, 1996.
- [2] <http://lozaradar.com>
- [3] V.V. Kopeikin, I.V. Krashenninikov, P.A. Morozov, A.V. Popov, Fang Guangyou, Liu Xiaojun, Zhou Bin, "Experimental Verification of LOZA-V GPR Penetration Depth and Signal Quality," *Proc. of 4th Internat. Workshop on Advanced GPR*, Naples, Italy, pp. 230-233, 2007.

- [4] T.T. Wu, R.W.P. King, "The cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 13, No.3, pp. 369-373, 1965.
- [5] N. Engheta, C.H. Papas, C. Elachi, "Radiation Patterns of Interfacial Dipole Antennas," *Radio Science*, vol. 17, No 6, pp. 1557-1566, 1982.
- [6] F. Edemsky, A. Popov, S. Zapunidi, "A time domain model of GPR antenna radiation pattern," *Internat. Journ. of Electronics and Telecommunications*, vol. 57, No 3, pp. 407-411, 2011.