

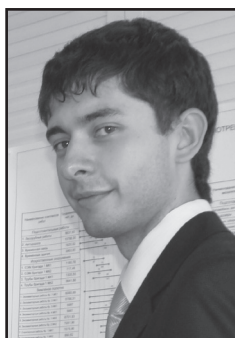


Литологическое расчленение разреза по данным георадиолокации



Виктор ПУПАТЕНКО
Victor V. PUPATENKO

Юрий СУХОБОК
Yuri A. SUHOBOK



Пупатенко Виктор Викторович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Железнодорожный путь, основания и фундаменты» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС).

Сухобок Юрий Андреевич — преподаватель ДВГУПС, Хабаровск, Россия.

В статье оценивается развитие методики получения глубинного разреза сильно дифференцируемой по скоростным параметрам среды, сложенной субгоризонтальными слоями, на основе георадарного профилирования и георадарного зондирования. Разработан итеративный алгоритм подбора и уточнения годографов отраженных и головных волн, определения основных характеристик слоев. Приведены результаты экспериментальной проверки методики. Сделаны обобщения и выводы для практики обследования инфраструктуры объектов транспорта.

Ключевые слова: инженерная геофизика, литология, георадиолокация, методика, георадарное профилирование, зондирование, грунтовый разрез, временной разрез, пластовая скорость, квадратичная скорость, надежность инфраструктуры.

Георадиолокация (англ. ground-penetrating radar, GPR) как метод геофизического обследования основан на излучении широкополосного сигнала радиочастотного диапазона в толщу среды и регистрации отклика — сигнала, являющегося суперпозицией амплитуд прямых, отраженных и преломленных волн, достигших приемной антенны.

Важным практическим приложением метода при обследовании объектов транспортной инфраструктуры служит *построение грунтового разреза* ее среды. Среда в общем случае неоднородна, однако с точностью, достаточной для прикладных целей, можно считать, что она состоит из конечного количества однородных субгоризонтальных слоев. В такой модели при переходе из слоя в слой электрофизические свойства грунтов меняются скачкообразно. Например, при обследовании земляного полотна железных или автомобильных дорог, взлетно-посадочных полос и других объектов выделяются слои насыпного грунта и грунтов основания в различном состоянии (обводненные или необводненные, оттаявшие или мерзлые), инженерные сооружения, армирующие,

изолирующие и разделительные слои и конструкции.

Для построения глубинного разреза на протяженном участке обычно проводят георадиолокационное обследование по технологии георадарного профилирования. На местности намечается линейный профиль, вдоль которого с заданным шагом перемещается георадар с постоянным расстоянием между передающей и приемной антеннами. На каждой его остановке регистрируется очередной сигнал (трасса). Трассы со всех стоянок в совокупности формируют радарограмму.

Задачи камеральной обработки состоят в том, чтобы, во-первых, выявить положение границ раздела сред на радарограмме и, во-вторых, определить, на какой глубине расположены эти границы.

Первая задача, подробно исследованная в [1, 2], не является предметом данной статьи. Будем считать, что тем или иным образом границы раздела сред выделены. Исходная радарограмма представляет собой временной разрез: каждая трасса — это зависимость амплитуды сигнала, пришедшего на приемную антенну, от времени его прихода.

То есть речь пойдет о второй задаче, и цель исследования — совершенствование методики определения глубин залегания границ раздела слоев, преобразования временного разреза в глубинный разрез.

Существующие методы преобразования

В процессе преобразования временного разреза в глубинный требуется прежде всего рассчитать скорость прохождения электромагнитных волн в каждом слое (пластовую скорость). В связи с тем, что отраженный сигнал проходит сквозь всю грунтовую толщу, для определения пластовой скорости вводится понятие среднеквадратичной, осредненной скорости распространения электромагнитных волн на участке прохождения сигнала от поверхности земли (источника излучения) до заданной точки грунтовой среды. Пластовые и среднеквадратичные скорости связаны между собой.

Есть несколько способов расчета среднеквадратичных и, соответственно, пластовых скоростей. Наиболее простой — компарационный метод измерений, который имеет в виду расчет скорости по годо-

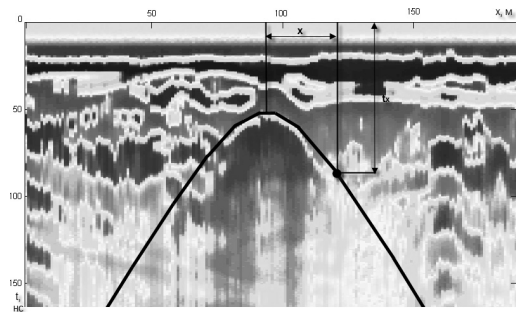


Рис. 1. Пример радарограммы с выделенной гиперболой от локального дифрагирующего объекта.

графам дифрагированных волн [2]. Суть метода в том, что если в зоне разреза расположены локальные дифрагирующие объекты (большие камни, трубы, кабели), то на радарограмме, полученной после георадарного профилирования, выделяется годограф гиперболического очертания (рис. 1). Любая точка этой гиперболы (x, t_x) удовлетворяет уравнению [3]:

$$V_{cp} = \frac{\sqrt{(x-0,5a)^2 + h^2} + \sqrt{(x+0,5a)^2 + h^2}}{t_x}, \quad (1)$$

где x — горизонтальное смещение от вершины гиперболы до данной точки, м; t_x — двойное время пробега до данной точки, нс; V_{cp} — среднеквадратичная скорость распространения сигнала от поверхности земли до вершины гиперболы, м/нс; h — глубина, соответствующая положению вершины гиперболы, м; a — расстояние между антеннами георадара, м.

По любым точкам гиперболы составляется система из уравнений вида (1), решение которой дает среднеквадратичную скорость распространения электромагнитных волн в точке, удаленной от поверхности земли на глубину h .

Недостаток этого метода в том, что для его успешного применения требуется свое количество локальных дифрагирующих объектов на разных глубинах. Нередко такие объекты располагаются лишь в верхней части разреза и неравномерно по длине профиля. При большом количестве помех очертание гиперболических годографов не всегда уверенно выделяется, что приводит к ошибкам в определении значений скоростей.

Другой способ определения скоростей распространения волн в слоях основан



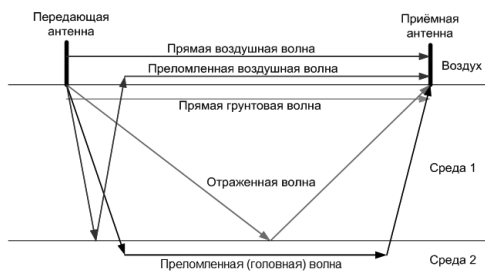


Рис. 2. Схема распространения волн для двухслойной среды с горизонтальной границей.

на изменении амплитуды сигнала на границе слоев [4]. Основным недостатком этого способа расчета является сложность измерения амплитуды затухающего сигнала, что приводит к существенным ошибкам при оценке глубины отражающей границы. Кроме того, на границах сред с незначительным изменением диэлектрической проницаемости может не наблюдаться резкого скачка амплитуд. В то же время из-за помех и переотражений не исключены «ложные» скачки, не связанные с границами раздела сред.

Еще один метод заключается в непосредственном измерении скоростей с помощью георадарного зондирования, при котором положение одной из антенн фиксируется, а другая последовательно отдалается от неподвижной антенны. Расстояние между антеннами увеличивается от нуля до максимального значения (обычно до десяти метров).

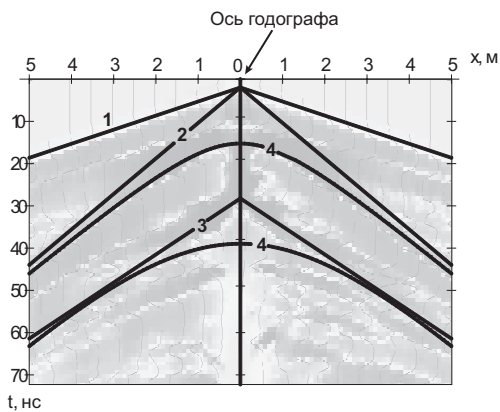


Рис. 3. Радарограмма, полученная после испытания георадарным зондированием. Выделены прямолинейные годографы прямой воздушной волны (1), прямой грунтовой волны (2), преломленной (головной) волны (3); гиперболические годографы отраженных волн (4); x — ось расстояний между антеннами, м.

При каждом положении антенн генерируется электромагнитный импульс и фиксируется сигнал, пришедший на приемную антенну. В этом сигнале можно выделить различные типы волн: прямые, преломленные и отраженные. Для простейшей двухслойной среды с горизонтальной границей схема хода различных волн приведена на рис. 2. Годографы волн выделяют на радарограмме, полученной после испытания зондированием (рис. 3).

Годографы отраженных волн аппроксимируются гиперболами, для каждой из них подбирается соответствующее уравнение. Если принять допущение, что траектории лучей прямолинейны (не изменяются при переходе из среды в среду), то уравнение годографа принимает известный в инженерной сейсмике вид [5]:

$$t_{refl-n}(x) = \frac{1}{V_{эф}} \sqrt{4H_n^2 + x^2}, \quad (2)$$

где t_{refl-n} — двойное время хода отраженной волны, нс; x — разнос между антеннами, м; H_n — глубина до верхней кровли n -го слоя, м; $V_{эф}$ — эффективная скорость распространения электромагнитных волн в среде; в данном случае совпадает со среднеквадратичной скоростью распространения электромагнитных волн от поверхности земли до кровли n -го слоя V_{cp} , м/нс.

Поиск среднеквадратичных скоростей распространения волн и глубин границ сводится к подбору коэффициентов уравнения (2). Эти значения могут быть уточнены путем аппроксимации годографов прямых и преломленных волн.

По найденным пластовым скоростям определяется h_i — толщина (мощность) каждого слоя, м:

$$h_i = \frac{(t_{0(i)} - t_{0(i-1)}) \cdot V_i}{2}, \quad (3)$$

где $t_{0(i)}$ — двойное время хода сигнала волны, отраженной от границы i -го и $(i+1)$ -го слоев (соответствует положению вершины гиперболы отраженной волны), нс; $t_{0(i-1)}$ — то же для волны, отраженной от границы $(i-1)$ -го и i -го слоев, нс.

Существенный недостаток методики состоит в допущении, что траектории лучей прямолинейны. Однако при переходе лу-

чей из одного слоя в другой они испытывают процесс преломления и соответственно отклоняются от первоначального направления.

Поэтому методика может быть использована только для сред, в которых скорости распространения электромагнитных волн отличаются друг от друга на 10–15%. Если же обследуемая среда сильно дифференцируема по скоростям, отклонением траектории луча от прямой линии пренебрегать нельзя.

Таким образом, методика, базирующаяся на обработке результатов зондирования, имеет универсальный характер. Компарационный способ, а также способ, основанный на изменении амплитуды сигналов, подходит только для проверки и корректировки уже полученных данных.

В простейшей реализации методика не позволяет рассчитать грунтовую модель с высокой скоростной дифференциацией слоев. Поэтому задача заключалась в развитии методики без этого ограничения.

СНЯТИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ

Рассмотрим модель распространения отраженной волны в многослойной среде, состоящей из отдельных однородных слоев с горизонтальными границами (рис. 4).

Согласно [6, 7] в этой модели годографы отраженных волн перестают иметь гиперболический вид (рис. 5а). Их уравнение можно задать в параметрической форме:

$$\begin{cases} t_n(p) = 2 \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_i \cdot \sqrt{1 - p^2 V_i^2}} \\ x_n(p) = 2 \sum_{i=1}^n \frac{p \cdot h_i \cdot V_i}{\sqrt{1 - p^2 V_i^2}} \end{cases} \quad (4)$$

где n – количество слоев; V_i – скорость распространения электромагнитных волн в i -м слое (пластовая скорость), м/нс; h_i – мощность i -го слоя, м; p – параметр луча, определяемый по формуле

$$p = \frac{\sin \alpha_1}{V_1} = \frac{\sin \alpha_2}{V_2} = \dots = \frac{\sin \alpha_n}{V_n}, \quad (5)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – угол входа луча соответственно в первый, второй, ..., n -й слои.

Показано [6], что из уравнения (4) невозможно вывести формулы для вычисления искоемых пластовых скоростей. Кроме

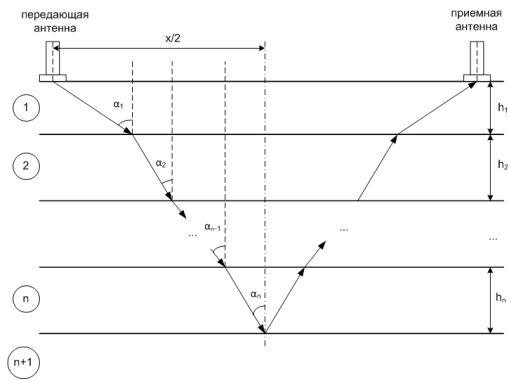


Рис. 4. Схема распространения отраженной волны в многослойной среде с горизонтальными границами: x – расстояние между антеннами, м; h_i – мощность i -го слоя, м.

того, уравнение непредставимо в непараметрической форме, в виде зависимости $t = f(x)$. Это говорит о принципиальной невозможности подбора по выделенному годографу уравнения типа (4), а значит, и точного расчета искоемых скоростей.

В инженерной сейсмике в качестве приближенного способа определения пластовых скоростей обычно используют способ предельно эффективной скорости [5]. Он основан на аппроксимации кривой (4) гиперболой. По уравнению (2) этой гиперболы определяется эффективная скорость $V_{эф}$, которая не совпадает со средней квадратичной скоростью и которую нельзя пересчитать в искомые пластовые скорости.

Однако в [5] указано, что при приближении к оси годографа, в сечении которого расстояние между антеннами равно нулю, эффективная скорость, в данном случае называемая предельно эффективной – $V_{эф} = \lim_{x \rightarrow 0} V(x)$, может быть пересчитана в пластовые по формуле Урупова-Дикса:

$$V_i = \sqrt{\frac{V_{e(i)} \cdot t_{0(i)} - V_{e(i-1)} \cdot t_{0(i-1)}}{t_{0(i)} - t_{0(i-1)}}}, \quad (6)$$

где $V_{e(i)}$ – предельная эффективная скорость по гиперболу, аппроксимирующей годограф волны, отраженной от i -го слоя, м/нс; $t_{0(i)}$ – двойное время хода сигнала волны, отраженной от границы i -го и $(i+1)$ -го слоев (соответствует положению вершины гиперболы отраженной волны), нс; $V_{e(i-1)}$ и $t_{0(i-1)}$ – то же для $(i-1)$ -го слоя.

То есть предельную эффективную скорость V_e можно получить, если аппрокси-



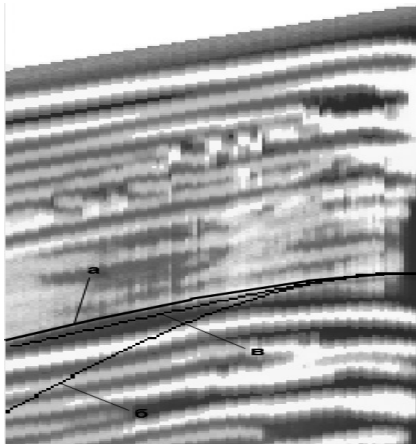


Рис. 5. Часть радарограммы, полученной после испытания зондированием: а – очертание фактического негиперболического годографа отраженной волны; б – условный гиперболический годограф; в – расчетный годограф.

мировать гиперболой не весь годограф отраженных волн, а лишь ту его часть, которая как можно ближе прилегает к оси годографа. Назовем эту аппроксимирующую гиперболу *условным годографом* (рис. 5б). По условным годографам строится грунтовая модель: рассчитываются скорости распространения волн в слоях и находятся мощности слоев по формуле (3).

Способ определения параметров грунтовой модели (решения обратной геофизической задачи) исключительно по условным годографам носит приближенный характер: лишь в редких случаях удается с первого раза подобрать верное положение условного годографа. Никакой проверки правильности этого не предусмотрено.

Разработан итеративный алгоритм расчета, основанный на последовательном приближении параметров грунтовой модели $\{h_i, V_i\}$. По текущим параметрам модели численно решается уравнение (4) относительно x и t (реализуется прямая геофизическая задача – построение *расчетного годографа* по данным грунтовой модели). Решение уравнения состоит в подборе такого угла α_1 и соответственно такого параметра p , чтобы величина x была равна текущему расстоянию между антеннами. Перебирая все расстояния между антеннами от нуля до максимального значения и численно решая таким образом уравнение (4), получаем набор точек (x_j, t_j) для

$0 \leq x_j \leq x_{max}$. Эти точки формируют расчетный годограф (рис. 6в), который необходимо сравнить с фактическим годографом. Если расчетный и фактический годографы не совпадают, следует внести коррективы в условный годограф и снова решить обратную и прямую геофизическую задачу.

При наличии априорной информации о мощностях некоторых слоев и скоростях распространения электромагнитных волн в некоторых средах перед решением прямой задачи необходимо вводить коррективы в грунтовую модель. В этом случае также следует пересчитывать условный годограф по обратной формуле Урупова-Дикса [8]:

$$V_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n h_i \cdot V_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_i}}}, \quad (7)$$

$$t_{0(i)} = t_{0(i-1)} + \frac{2h_i}{V_i}, \quad \text{для всех } i=1 \dots n-1 \quad (8)$$

где $t_{0(i)}$ – положение вершины i -го гиперболического условного годографа, нс; h_i – мощность i -го слоя, м; V_i – пластовая скорость в i -м слое, м/нс.

Итеративный процесс выполняется до тех пор, пока фактический и расчетный годограф визуально не совпадут. Для минимизации невязки применяются методы математической статистики, например, метод наименьших квадратов.

Окончательная проверка правильности построения грунтовой модели предполагает использование прямолинейных годографов головных (преломленных) волн и прямой грунтовой волны (рис. 4). Уравнения этих годографов имеют вид [7]:

$$t_{dir}(x) = \frac{x}{V_1}, \quad (9)$$

$$t_{refr-n}(x) = \frac{x}{V_n} + t_0, \quad (10)$$

где $t_{dir}(x)$, $t_{refr-n}(x)$ – уравнения годографов соответственно прямой грунтовой волны и преломленной (головной) волны в n -м слое; x – расстояние между антеннами, м; V_1 – скорость распространения электромагнитных волн в верхней части первого слоя, м/нс; V_n – граничная скорость рас-

пространения электромагнитных волн в n -м слое (может быть несколько больше, чем соответствующая пластовая скорость), м/нс; x – расстояние между антеннами, м; t_0 – двойное время прихода преломленной волны при $x = 0$, нс.

Очертания годографов прямой грунтовой волны и преломленных волн аппроксимируются уравнениями (9) – (10), по которым определяются скоростные параметры слоев. Сравнение полученных скоростей с исходными параметрами грунтовой модели позволяет внести в нее коррективы, минимизируя невязки.

Последний этап – собственно преобразование временного разреза в глубинный по данным грунтовой модели. По известным скоростям распространения электромагнитных волн в грунтовых средах отмечаются точки границ раздела слоев.

Это выполняется на основе численного решения уравнения (4) отдельно для каждого положения георадара и отдельно для каждой границы. Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{2}{V_n \cdot \sqrt{1 - p^2 V_n^2}}; \\ b_1 &= 2 \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{V_i \cdot \sqrt{1 - p^2 V_i^2}}; \\ k_2 &= \frac{2 \cdot p \cdot V_n}{\sqrt{1 - p^2 V_n^2}}; \\ b_2 &= 2 \sum_{i=1}^{n-1} \frac{p \cdot h_i \cdot V_i}{\sqrt{1 - p^2 V_i^2}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Заменим уравнения (4) с учетом этих обозначений:

$$\begin{cases} t_n = k_1 \cdot h_n + b_1 \\ x_n = k_2 \cdot h_n + b_2 \end{cases} \quad (12)$$

Отметим, что при заданном параметре p уравнения (12) превращаются в линейные уравнения с одним неизвестным в связи с тем, что скорости распространения электромагнитных волн в слоях $\{V_i\}$, мощности вышележащих слоев $\{h_i\}$, кроме текущего h_n , время проявления границы на трассе t_n и расстояние между антеннами x заданы. Величина h_n может быть найдена из уравнений (12) по формулам:

$$h_n = \frac{t_n - b_1}{k_1} = \frac{x_n - b_2}{k_2}. \quad (13)$$

Решение уравнения (12) сводится к последовательному подбору такого угла α_1 и, соответственно, такого параметра p , чтобы получить одинаковый результат (13) и искомую толщину слоя.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Для опытной проверки разработанной методики были проведены испытания на водных акваториях в зимний период, в частности, в акватории р. Амур у г. Хабаровска. Обследуемая среда состояла из трех слоев: снега, льда и воды. По [1] в этих средах скорости распространения электромагнитных волн различаются в пять раз и более. Толщина снега и льда составляла соответственно 0,22 и 1 м.

Использовался георадар ЛОЗА-Н в комплекте с антеннами 1,5 м (центральная частота сигнала 100 МГц). Обследование проводилось методом георадарного профилирования, расстояние между антеннами было 1,3 м, шаг между последовательными перестановками прибора – 0,5 м, временная развертка – 2048 нс (рис. 6).

В сечении профиля на расстоянии 879 м от его начала испытание строилось на методе георадарного зондирования. При этом шаг между стоянками георадара составлял 10 см, а временная развертка – 512 нс. На полученной радарограмме были выделены годографы от различных типов волн и выполнен расчет характеристик выделенных слоев (толщина снега, льда и воды, а также скорости распространения электромагнитных волн в этих средах). Удалось выявить и еще один слой: небольшую (20 см) воздушную прослойку между льдом и водой.

По построенной грунтовой модели (таблица 1) временной разрез (рис. 7) был переведен в глубинный разрез. При этом границы раздела слоев снега и льда по всей длине профиля предполагались горизонтальными, наличием незначительной воздушной прослойки вблизи берегов пренебрегли. Положение границы раздела воды с минеральным дном определялось по переломам сигнала трассы (рис. 6).

Для проверки результатов эксперимента были использованы значения промеров



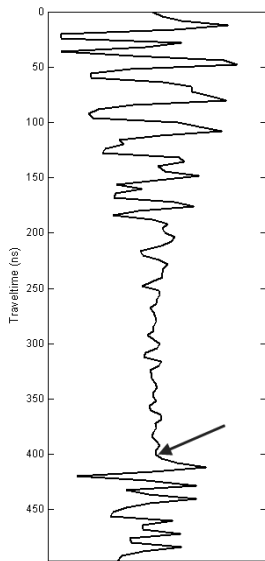


Рис. 6. Пример трассы с выделенным положением прихода отраженного сигнала от границы между водой и дном (указано стрелкой).

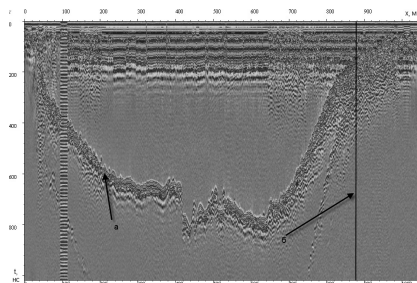


Рис. 7. Радарограмма, полученная при профилировании дна р. Амур у г. Хабаровска: а – сигнал, отраженный от дна; б – ось профиля при испытании зондированием.

глубин, выполненных лотом при бурении лунок со льда. Сравнение суммарной толщины слоев снега и льда с контрольными данными приведено на рис. 8. Разность отметок составила не более 50 см. На участке наибольшего течения контрольные измерения в двух точках отличаются на 1–1,5 м, что связано с погрешностями

при выполнении замеров. По рис. 7 хорошо видно, что уклон дна на расстоянии 250 м от начала профиля равномерный и подъема отметок на 1,5 м нет.

Георадиолокационное обследование, отметим, удобно выполнять в зимнее время со льда водоема, совмещая работы с геодезической съемкой. Для озер и рек с небольшим течением возможно обследование и в теплый период.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволили разработать методику определения границ разнородных сред, предназначенную для литологического расчленения геологического разреза. Область ее применения не ограничивается профилированием дна водоемов и рек. С учетом предлагаемой методики на объектах транспортной инфраструктуры определялись границы насыпного грунта при сооружении земляного полотна, контуров котлованов, поверхности смещения при обследовании оползневых склонов, успешно решался и ряд других задач.

Практика показала, что комплексное использование традиционных (бурение, шурфование) и геофизических методов (георадиолокационного, сейсмического и т. д.) позволяет обеспечить достоверность получаемых результатов и сократить затраты труда и времени при инженерно-геологическом обследовании среды в зоне сооружения новых или реконструкции длительно эксплуатируемых объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ground Penetrating Radar / edited by David J. Daniels. – London, the Institution of Electrical Engineers, 2009. – 734 p.
2. Вопросы подповерхностной радиолокации: Коллективная монография / Под ред. А. Ю. Гриньва. – М.: Радиотехника, 2005. – 416 с.

Таблица 1

Параметры зондируемых сред

Мощность слоя, м	Скорость распространения электромагнитных волн в слое, м/нс	Теоретическая скорость распространения электромагнитных волн в слое, м/нс	Среда
0,22	0,088	0,087–0,122	снег
1,00	0,155	0,150	лед
0,20	0,288	0,300	воздушная прослойка
1,93	0,033	0,033	вода

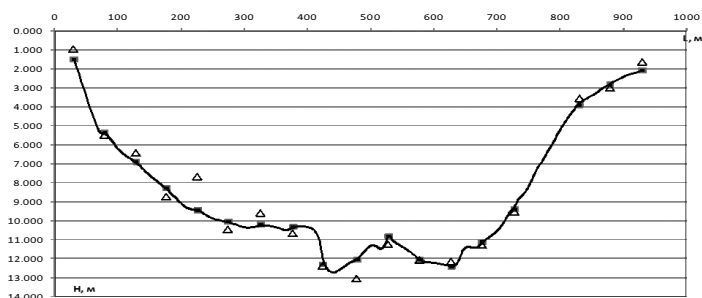


Рис. 8. Сравнение суммарной толщины воды и льда, определенной по данным георадиолокации (черная линия), с контрольными величинами (треугольные маркеры).

3. Huisman J. A., Hubbard S. S., Redman J. D., Annan A. P. Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Review // *Vadose Zone Journal*, issue 2. – Madison, Soil Science Society of America, 2003. – P. 476–491.

4. Huang C., Su Y. A new GPR calibration method for high accuracy thickness and permittivity measurement of multi-layered pavement // Tenth International Conference of Ground Penetrating Radar 21–24 June, 2004. – Delft, 2004. – p. 627–630.

5. Урупов А. К. Изучение скоростей в сейсмозведке. – М.: Недра, 1966. – 224 с.

6. Левин А. Н. Приближенные представления годографа отраженных волн для горизонтально-слоистой покрывающей среды // *Прикладная геофизика*. Вып. 77. – М.: Недра, 1975. – С. 48–55.

7. Сейсмозведка: Справочник геофизика / Под ред. И. И. Гурвича, В. П. Номоконова. – М.: Недра, 1981. – С. 105–106.

8. Лозинский З. Н. Учет влияния слоистости покрывающей толщи при определении скоростной характеристики среды // *Прикладная геофизика*. Вып. 86. – М.: Недра, 1977. – С. 34–45. ●

LITHOLOGICAL PROFILING WITH GROUND-PENETRATING RADAR

Pupatenko, Victor V. – Ph.D. (Tech), associate professor of the department of rail track and foundations of Far-Eastern State University of Railway Engineering, Khabarovsk, Russia.

Suhobok, Yuri A. – lecturer of Far-Eastern State University of Railway Engineering, Khabarovsk, Russia.

The article assesses developments of a method of achieving of a deepened profiling of an environment, which is strongly differentiated by speed parameters and built by sub horizontal layers, with the help of geo radar profiling and geo radar scanning. The authors have elaborated an iterative algorithm of selection

and refinement of hodograph curve of reflected and main waves, of determination of the features of layers. The authors show the results of experimental testing of the method, and suggest some conclusions concerning possible use of the method for monitoring of transport structures.

Key words: engineering geophysics, ground-penetrating radars, geo radar profiling, geo radar scanning, ground profiling, time profiling, bed (sheet) speed, quadratic velocity, reliability of infrastructure.

REFERENCES

1. Ground Penetrating Radar / edited by David J. Daniels. – London, the Institution of Electrical Engineers, 2009. – 734 p.

2. Issues of underground radiolocation. Collective monograph, ed. by A. Yu. Grinev [*Voprosy podpoverhnostnoy radiolokatsii: Kollektivnaya monografiya*]. Moscow, Radiotekhnika publ., 2005, 416 p.

3. Huisman J. A., Hubbard S. S., Redman J. D., Annan A. P. Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Review // *Vadose Zone Journal*, issue 2. – Madison, Soil Science Society of America, 2003, pp. 476–491.

4. Huang C., Su Y. A new GPR calibration method for high accuracy thickness and permittivity measurement of multi-layered pavement // Tenth International Conference of Ground Penetrating Radar 21–24 June, 2004, Delft, 2004, pp. 627–630.

5. Урупов А. К. Study on the velocity in seismic

exploration [*Izucheniye skorostey v seysmorazvedke*]. Moscow, Nedra publ., 1966, 224 p.

6. Levin A. N. Approximated data of hodograph of reflected waves for horizontal and layer-type covering environment [*Priblizhennyye predstavleniya godografa otrazhennykh voln dlya gorizontarno-sloistoy pokryvayushey sredy*]. *Prikladnaya geofizika*, Vol. 77. Moscow, Nedra publ., 1975, pp. 48–55.

7. Seismic exploration. Guidebook for geophysicist. Ed. by I. I. Gurvich, V. P. Nomokonov [*Seysmorazvedka: Spravochnik geofizika*]. Moscow, Nedra publ., 1981, pp. 105–106.

8. Lozinskiy Z. N. Consideration of the impact of layer structure of covering series for determination of velocity features of the environment [*Uchet vliyaniya sloistosti pokryvayushey tolschi pri opredelenii skorostnoy harakteristiki sredy*]. *Prikladnaya geofizika*, Vol. 86. Moscow, Nedra publ., 1977, pp. 34–45.

Координаты авторов (contact information): Пупатенко В. В. (Pupatenko V. V.) – pvv@festu.khv.ru, Сухобок Ю. А. (Suhobok Yu.A.) – yusukhobok@mail.ru.

Статья поступила в редакцию / article received 25.01.2013
Принята к публикации / article accepted 12.02.2013

