

Определение электрофизических свойств грунтов в откосных зонах земляного полотна при георадарном обследовании



Виктор ПУПАТЕНКО



Юрий СУХОБОК



Геннадий СТОЯНОВИЧ

Пупатенко Виктор Викторович – Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия.

Сухобок Юрий Андреевич – Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия.

Стоянович Геннадий Михайлович – Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия*.

В статье описан новый способ проведения георадиолокационного обследования откосных зон грунтовых объектов транспортной инфраструктуры. В литологическом разрезе этих объектов присутствуют субгоризонтальные и наклонные границы раздела грунтов, а также откосные зоны. Традиционные методы обследования (бурение, шурфование), а также стандартный метод георадиолокации позволяют достоверно обследовать на этих объектах, как правило, лишь зоны под горизонтальной основной площадкой земляного полотна и субгоризонтальные участки основания вне его границ. Обследование под наклонными поверхностями часто затруднено или технически – геофизические методы, также как и традиционные, дают весьма сложную для дальнейшей расшифровки исходную информацию. Разрезы заполнены переотражениями и помехами, а процесс их расшифровки связан с большими методическими проблемами.

В данной работе представлен новый способ определения скоростей распространения радиоволн в приоткосных зонах дорожного земляного полотна. Исходной информацией являются данные, полученные при обследовании методом общей глубинной точки (ОГТ), при этом применяется известная

методика обследования и стандартный набор аппаратных средств. Новизна результатов статьи определяется разработанным авторами алгоритмом обработки результатов измерений. Выполненная на его основе программная реализация даёт возможность получения уравнения годографа с учётом наклона слоёв. Учтены определяющие геометрические характеристики насыпей – наличие откосов переменной крутизны. Предложена методика расчёта скорости распространения радиоволн для двухслойной среды с границей, наклонённой к поверхности сканирования. Выполнена проверка достоверности разработанного способа с помощью моделирования методом конечных разностей во временной области.

В статье приведены примеры практического применения разработанного метода при георадарном обследовании реальных объектов земляного полотна (объектов транспортной инфраструктуры). Предложенный в статье метод даёт возможность увеличения информативной площади обследуемых поперечников. При этом сохраняется точность георадарного метода, увеличивается зона его применения для получения достоверной информации до 60 % от площади поперечного сечения земляного полотна.

Ключевые слова: транспорт, железные дороги, георадиолокация, георадар, земляное полотно, метод общей глубинной точки, годограф, диэлектрическая проницаемость, откос.

*Информация об авторах:

Пупатенко Виктор Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры железнодорожного пути Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия, pwv@festu.khv.ru.

Сухобок Юрий Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры железнодорожного пути Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия, yusukhobok@mail.ru.

Стоянович Геннадий Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры железнодорожного пути Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), Хабаровск, Россия, oif@festu.khv.ru.

Статья поступила в редакцию 26.10.2020, принята к публикации 27.12.2020.

For the English text of the article please see p. 98.

ВВЕДЕНИЕ

Качественные инженерные решения должны быть основаны на достоверной исходной информации. Для проектирования земляного полотна, обеспечения его прочности и надёжности требуются не только прочностные и деформационные характеристики грунтов, но и данные о геометрии слоёв грунта. Задача получения объективной информации при обследовании объекта (инженерно-геологическом, геофизическом и других) является актуальной. Метод георадиолокации позволяет решать задачи определения границ слоёв грунтов земляного полотна, его основания [1; 2], позволяет выявить особенности строения объекта, восстановить историю его сооружения, последовательность работ по реконструкции и восстановлению. Не менее актуальными являются задачи поиска поверхностей смещения оползневых массивов [3; 4]. В особых условиях, например, при наличии многолетнемерзлых грунтов в земляном полотне и его основании [5], георадарное обследование в сочетании с другими геофизическими методами позволяет определять различные по физическим характеристикам слои.

К преимуществам георадарного обследования следует отнести его невысокую стоимость (сравнительно с традиционными методами), возможность выполнения работ в таких условиях, где применение, например, буровой установки затруднено или вообще невозможно. Небольшой вес оборудования и состав исполнителей (как правило, два-три человека), высокая скорость обследования протяжённых транспортных сооружений также является важным преимуществом.

Особенностью исходных георадиолокационных данных (радарограмм) является то, что они являются временными разрезами, то есть на них отображается зависимость амплитуды сигнала от времени его возвращения к приёмной антенне. Однако для решения инженерных задач требуется построение глубинного разреза. Для выполнения преобразования исходного временного разреза в глубинный разрез (миграции) требуется выбрать корректную скоростную модель среды [6–8].

Скорость распространения электромагнитных волн в среде зависит от её электро-

физических свойств, в частности, от относительной диэлектрической проницаемости ϵ . Диэлектрическая проницаемость, в свою очередь, определяется видом грунта и его физическими свойствами. Экспериментами установлено [6; 7; 9], что наибольшее влияние на диэлектрическую проницаемость оказывает влажность грунта и, в меньшей степени, — температура грунта, плотность и другие параметры.

Существуют справочные таблицы, по которым можно оценить скорость распространения радиоволн в зависимости от вида грунта и качественной оценки его состояния (влажное, сухое, талое или мерзлое) [6; 9]. Однако анализ данных показывает, что даже для одного типа грунта диапазон изменения характеристик значителен. Это приводит к погрешности в определении геометрии слоёв грунтов. Кроме того, вид грунта и его состояние зачастую заранее неизвестны. Поэтому необходимы методы, позволяющие непосредственно в полевых условиях определять скоростные характеристики сред. За последние годы был разработан ряд таких методов.

Метод подбора [10] основан на использовании результатов контрольного бурения. Привязка слоёв осуществляется сверху вниз, по осям синфазности. Каждая ось синфазности на радарограмме предположительно коррелирует с границей слоёв на скважине. По известной толщине слоёв и временным отметкам рассчитываются искомые скорости. В случае недостоверности полученных значений текущая ось синфазности отбраковывается и процесс повторяется. Недостаток этого способа заключается в том, что проведение буровых работ дорого, трудоёмко и зачастую не настолько оперативно; при работе на ряде объектов не всегда можно быть уверенным в достоверности предоставляемых геологами данных. Также нет никаких гарантий того, что выделенная ось синфазности коррелирует именно с границей раздела слоёв, а не с помехой или переотражением. Кроме того, инженерно-геологическое бурение даёт информацию только в одной точке (сечении) разреза, тогда как скоростные характеристики грунтовых сред могут существенно меняться вдоль профиля.

Ряд других методов основан на прямом измерении диэлектрической проницаемо-



сти. Отбирается проба, которая затем испытывается в лабораторных условиях рефлектометром [6]. Сложность этого способа заключается в необходимости использования дорогостоящего лабораторного оборудования. Известна модификация этого метода [11], связанная с откопкой шурфа и проведением испытания с помощью георадара, конструкция которого позволяет разносить антенны. Однако и этот метод трудоёмок, а результаты привязаны к конкретной точке. Кроме того, с его помощью можно определить скорости лишь в приповерхностных слоях земляного полотна.

Наиболее распространённый способ определения скоростей основан на выделении дифракционных гиперболических волн на радарограмме. Дифракционные гиперболы возникают при наличии в среде объекта, поперечные размеры которого не превышают длину радиоволны [6]. Искомые скорости определяются по углу наклона ветвей дифракционной гиперболы. Недостатком этого метода является то, что часто эти объекты располагаются неравномерно по длине и глубине профиля. Не всегда очертания гиперболических волн можно уверенно выделить.

Если конструкция георадара позволяет изменять расстояние между антеннами, то определять скорости можно с использованием георадарного зондирования на переменной базе по методу общей глубинной точки [2; 10; 12]. При обработке радарограмм, полученных при таком испытании, выделяют гиперболические годографы отражённых волн. По ним определяются среднеквадратичные значения скорости распространения волн, которые затем пересчитываются в пластовые скорости в слоях по формуле Урупова–Дикса [13; 14]. Работа этим методом требует хорошего качества исходной информации, так как при большом количестве помех и неверно подобранных характеристиках оборудования годографы выявляются неуверенно (если вообще выявляются), что приводит к погрешностям в определении значений скоростей.

Есть и другие методы, связанные с анализом амплитуд отражений от границ [15; 16]. Однако они также в основном работают только для верхней части обследуемой

среды. Таким образом, современные методы позволяют определять скорости лишь в верхней части разреза. Наиболее, на наш взгляд, универсальному и недорогому способу — георадарному зондированию на переменной базе — также присуща эта особенность. При выполнении работ на основной площадке земляного полотна скорости распространения радиоволн в верхних его слоях определяются достоверно, а в средней и нижней частях разреза — зачастую лишь оценочно.

Вместе с тем, георадарное зондирование можно выполнять и на откосах насыпей. Основное препятствие для проведения зондирования на переменной базе на откосных частях состоит в том, что базовый метод общей глубинной точки предполагает, что границы раздела сред горизонтальны или субгоризонтальны (углом их наклона можно пренебречь). Однако под откосами насыпей границы раздела сред не параллельны поверхности съёмки (откосу).

Таким образом, *цель* работы заключается в разработке способа определения скоростей распространения радиоволн в приоткосных зонах по результатам георадарного зондирования на переменной базе. Для этого разработана *методика* расчёта скорости распространения радиоволн в среде с наклонными границами.

МЕТОДИКА РАСЧЁТА СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ДЛЯ СРЕДЫ С НАКЛОННОЙ ГРАНИЦЕЙ

Испытание методом георадарного зондирования на переменной базе может проводиться двумя способами. В первом — обе антенны одновременно разносятся от общего центра (ОГТ — метод общей глубинной точки). Во втором — одна из антенн не меняет своего положения, а вторая постепенно отдаляется от первой. При обследовании откоса земляного полотна удобно использовать вторую модификацию.

Расчётная схема проведения зондирования на переменной базе с одной наклонной границей раздела слоёв приведена на рис. 1. Обозначим текущее расстояние между антеннами георадара за x , толщину верхнего слоя — за H , искомую скорость распространения радиоволн в нём — за V ,

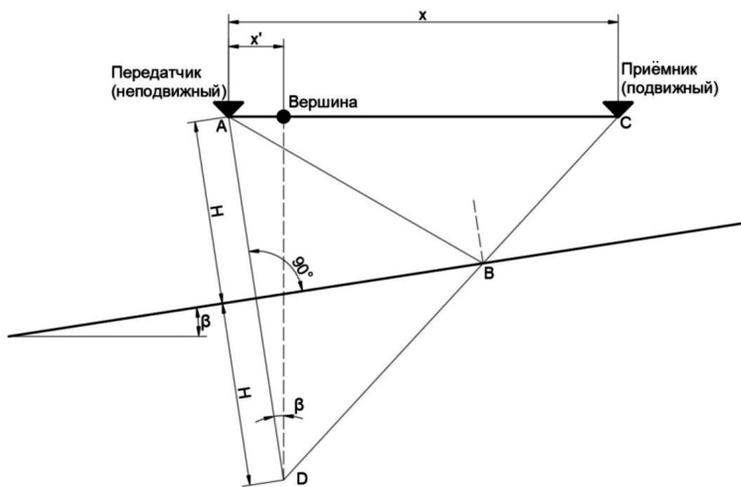


Рис. 1. Расчётная схема проведения георадарного зондирования на переменной базе для двухслойной среды с одной наклонной границей (составлено авторами).

угол наклона границы — за β . Высота слоя H измеряется в положении неподвижного передатчика по нормали к границе раздела слоёв. Электромагнитный сигнал, излучённый передающей антенной, отражается от границы раздела сред и фиксируется приёмной антенной через некоторое время t после излучения.

Уравнение годографа отражённой волны $t(x)$ получено из геометрических соотношений (рис. 1), где $ABC = DC$:

$$t(x) = \frac{\sqrt{(x - 2H \sin \beta)^2 + (2H \cos \beta)^2}}{V}, \quad (1)$$

$$x' = 2H \cdot \sin \beta. \quad (2)$$

При величине разноса между антеннами, равной нулю, формула (1) приводится к виду:

$$t_0 = \frac{2H}{V}. \quad (3)$$

После выражения величин H и β из (2) и (3) и подстановки их в (1), получено уравнение годографа:

$$t(x) = \frac{\sqrt{x^2 - 2 \cdot x \cdot x' + t_0^2 \cdot V^2}}{V}. \quad (4)$$

В случае горизонтальной границы, когда $\beta = 0$ и, следовательно, $x' = 0$, это уравнение сводится к известному уравнению годографа отражённой волны при горизонтальном расположении слоёв [2]:

$$t(x) = \sqrt{t_0^2 + \left(\frac{x}{V}\right)^2}. \quad (5)$$

Уравнение (4) представляет собой гиперболическую функцию. Однако если для

случая горизонтальной границы вершина гиперболического годографа соответствует нулевому разному ($x = 0$), то для случая наклонной границы вершина годографа смещается на величину x' .

Таким образом, предлагается следующая последовательность обработки георадарных данных:

1) на исходной радарограмме выявляется годограф гиперболического очертания со смещённой вершиной;

2) найденный годограф автоматически аппроксимируется уравнением гиперболы в соответствии с уравнением (4);

3) по уравнению (4) определяются параметры t_0 , V и x' ;

4) по уравнению (3) рассчитывается толщина слоя H ;

5) по уравнению (2) определяется угол наклона слоя β .

Эта методика реализована в программном комплексе GeoReader [17].

Для проверки достоверности разработанной методики рассмотрим две расчётные схемы для среды с двумя грунтовыми слоями. В первой расчётной схеме граница раздела сред горизонтальна (рис. 2а), во второй — расположена под углом 15° к поверхности сканирования (рис. 2б). Все размеры заданы в метрах. Передающая антенна георадара неподвижна, приёмная антенна перемещается с шагом 10 см по направлению от передатчика.

Результаты расчёта по традиционной методике [2] для среды с горизонтальной



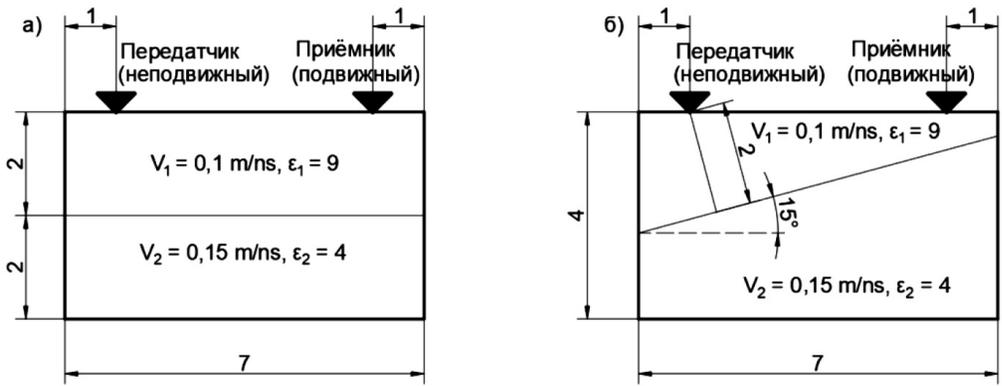


Рис. 2. Расчётные схемы: а – горизонтальная граница раздела слоёв; б – наклонная граница раздела слоёв ($\beta = 15^\circ$) (выполнено авторами).

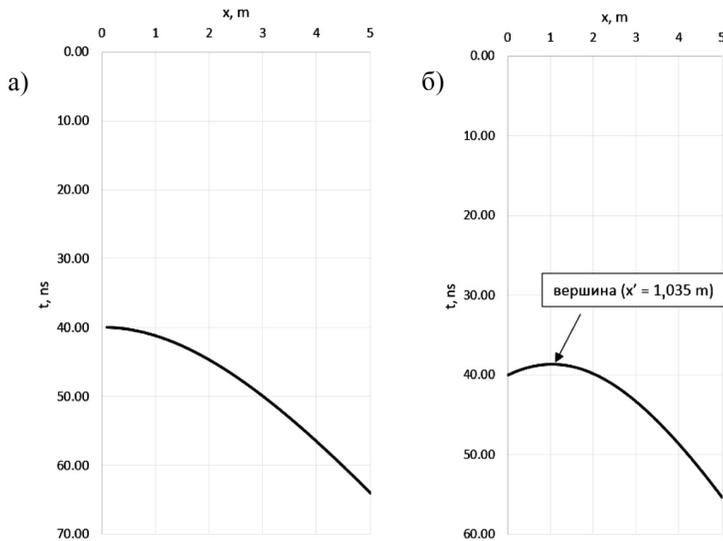


Рис. 3. Результаты расчёта годографов отражённых волн: а – горизонтальная граница раздела слоёв; б – наклонная граница раздела слоёв ($\beta = 15^\circ$) (выполнено авторами).

границей и по представленной в этой работе методике для среды с наклонной границей приведены на рис. 3. Как видно, для среды с наклонной границей вершина гиперболы смещается на величину $x' = 1,035$ м. При этом значение времени для $x = 0$ для обеих схем постоянное, 40 нс.

Для проверки правильности расчёта выполнено моделирование методом конечных разностей во временной области (FDTD) в программе grMax [19]. В качестве зондирующего импульса в модели использован импульс в виде МНАТ-вейвлета.

Результаты моделирования представлены на рис. 4.

Результаты моделирования полностью соответствуют расчёту. Положение расчётных гипербол (рис. 3), определённых по формулам (1–5), полностью совпадает с результатами численного моделирования (рис. 4).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАДИОВОЛН В ПРИОТКОСНЫХ ЗОНАХ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

В [14] показано, что для многослойной среды с несколькими непараллельными друг другу границами годографы отражённых волн невозможно представить в виде гиперболических функций и определить скоростные характеристики. Чтобы обойти

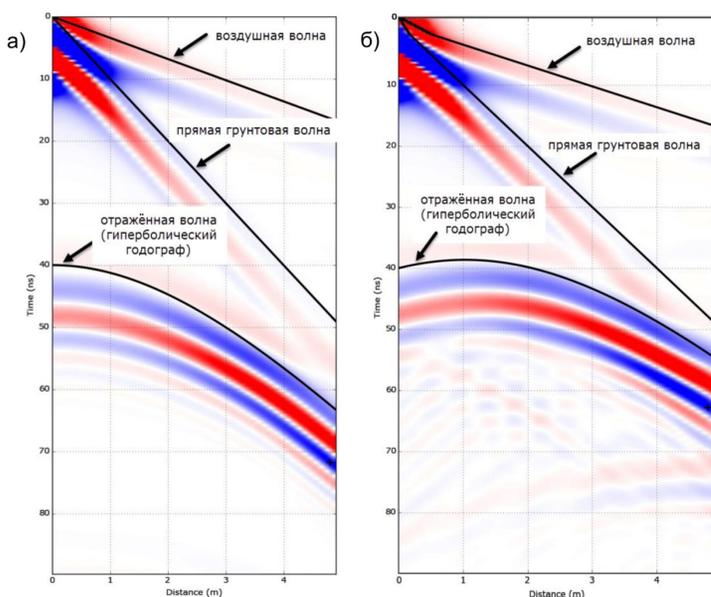


Рис. 4. Синтетические радарограммы, полученные при моделировании методом конечных разностей во временной области: а – горизонтальная граница раздела слоёв; б – наклонная граница раздела слоёв ($\beta = 15^\circ$) (выполнено авторами).

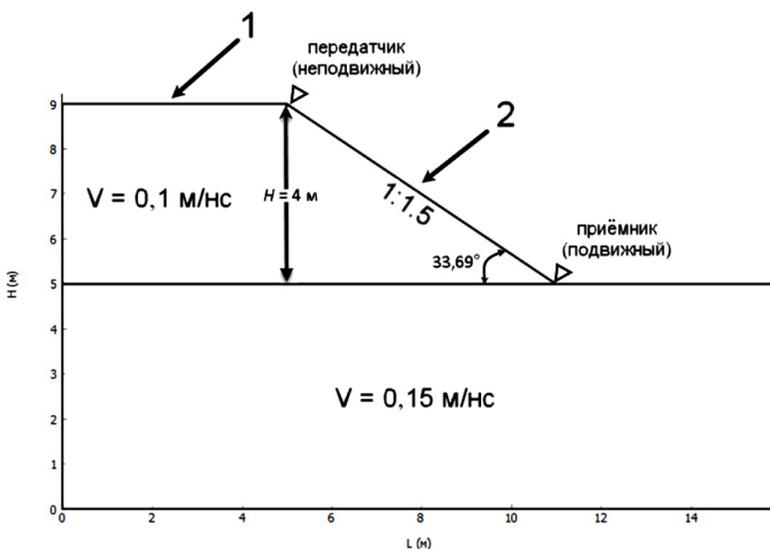


Рис. 5. Расчётная схема насыпи; обозначены участки георадарного зондирования на переменной базе: 1 – участок с горизонтальной границей (традиционный вариант), 2 – участок с наклонной границей (составлено авторами).

это ограничение, предлагается определять скорости распространения радиоволн непосредственно в приоткосной зоне для среды с одной наклонной границей.

Рассмотрим, каким образом по разработанной методике определения скоростных характеристик среды можно рассчитывать скорости в приоткосных зонах земляного полотна. На рис. 5 приведена расчётная схема насыпи и основания. Угол

наклона границы между насыпью и основанием по отношению к откосу составляет $33,69^\circ$ (уклон откоса 1:1,5).

Расчёт выполнен в двух вариантах: соответственно, с двухслойной средой с горизонтальной границей и двухслойной средой с наклонной границей. В первом варианте использована традиционная методика скоростного анализа [2], во втором – разработанная методика определе-



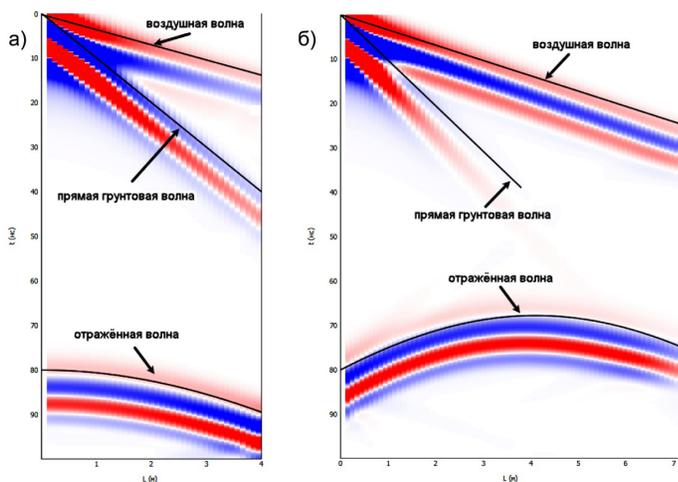


Рис. 6. Синтетические радарограммы, полученные при моделировании методом конечных разностей во временной области: а – первый участок, б – второй участок (составлено авторами).

Таблица 1

Результаты сравнения расчётных параметров с данными моделирования
(составлено авторами)

Параметр	Расчитанное значение	Заданное значение	Погрешность, %
Скорость распространения радиоволн, м/нс	0,096	0,1	4
Толщина слоя, м	3,86	4	3,5
Угол наклона границы, °	32,103	33,69	4,7

ния скоростей для среды с наклонной границей.

Для проверки результатов расчёта выполнено синтетическое моделирование в программе grgMax [19]. На полученные синтетические радарограммы (рис. 6) нанесены прямая воздушная волна, прямая грунтовая волна и гиперболические очертания годографа отражённых волн.

Результаты сравнения расчётных параметров с данными моделирования приведены в табл. 1.

Погрешности определения параметров, определённых по первому и второму участку в сечении бровки – откос, не превышают 5 %. Таким образом, при установке неподвижного передатчика в любой точке откоса можно определить толщину слоя под точкой установки и наклон границы слоёв грунта.

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Разработанная методика применена при георадарном обследовании участков строи-

тельства земляного полотна. Обследование выполнено сотрудниками кафедры «Железнодорожный путь» Дальневосточного государственного университета путей сообщения. Использовался георадар «ЛО-ЗА-В» в комплекте с антеннами различной длины от 1,5 до 6 м. Пройдено несколько продольных профилей по основной площадке земляного полотна антеннами длиной шесть и три метра (центральная частота сигнала 25 и 50 МГц). При обследовании поперечных профилей использовались антенны длиной 1,5 м (центральная частота сигнала – 100 МГц). В зоне под основной площадкой, благодаря применению низкочастотных антенн, получены разрезы глубиной до 18...20 м. Глубина георадарного разреза в откосных зонах оказалась ниже. Остались «слепые» зоны, в которых определить положение границ за пределами основной площадки не удалось. Контрольное бурение выполнялось только на основной площадке земляного полотна. Для определения скоростных характеристик грунтов под поверхностью откосов была применена предлагаемая методика.

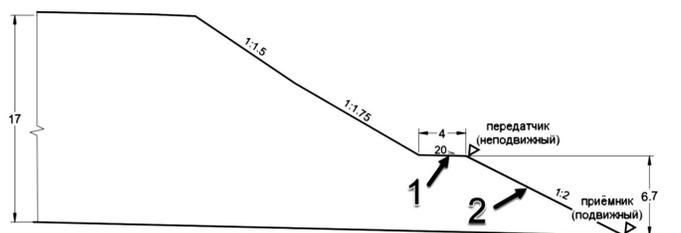


Рис. 7. Фрагмент поперечного профиля обследуемой насыпи; обозначены участки георадарного зондирования на переменной базе: 1 – на берме, 2 – на откосе бермы (составлено авторами).



Рис. 8. Проведение георадарного зондирования на переменной базе на откосе бермы (предоставлено авторами).

На поперечном профиле (рис. 7) выполнено георадарное зондирование на переменной базе в двух вариантах.

В первом варианте испытание проводилось на берме, с шагом 10 см. Во втором варианте – вдоль откоса бермы (рис. 8); при этом изначально антенны георадара были расположены вплотную друг к другу на бровке бермы, затем передающая антенна отодвигалась от приёмной в направлении к подошве откоса с шагом 10 см.

Полученные радарограммы приведены на рис. 9.

При расчёте годографа на берме использована традиционная методика скоростного анализа. В результате её использования получено, что скорость распространения радиоволн составляет 0,06 м/нс, толщина слоя – 0,756 м.

При расчёте годографов на откосе бермы обнаружилось, что присутствуют два вида гиперболических очертаний. Одно из них (рис. 9, 2) соответствует наклонной границе (со смещённой вершиной), другое (рис. 9, 3) – границе, параллельной откосу. Расчёт для первого годографа производился по традиционной методике скоростного анализа, для второго – по предлагаемой в работе методике.

Результаты расчёта по наклонной границе составляют, соответственно: скорость распространения радиоволн – 0,069 м/нс; угол наклона слоя – 35,43°; толщина слоя – 0,863 м. Результаты расчёта по горизонтальной границе: скорость распространения радиоволн – 0,058 м/нс; толщина слоя – 0,72 м. Скоростные характеристики находятся в интервале 0,058–0,069 м/нс, что соответствует грунту во влажном состоянии.

Полученные результаты позволили определить слои в нижней части обследуемой насыпи (рис. 10). На радарограмме, привязанной к отметкам поперечного профиля насыпи, удалось нанести границы грунтов, проследить их положение в средней части земляного полотна, до выхода на противоположный откос.

Благодаря рассчитанным по предлагаемой методике скоростям распространения радиоволн в грунтах выделены слои во влажном состоянии и выявлены слабые зоны в насыпи.

Проведённые работы показали, что предлагаемая методика может быть расширена и дополнена упрощённым способом определения скоростных характеристик грунтов откосной зоны за счёт перерасчёта предварительной геометрии границ слоёв, полученной непосредственно в полевых



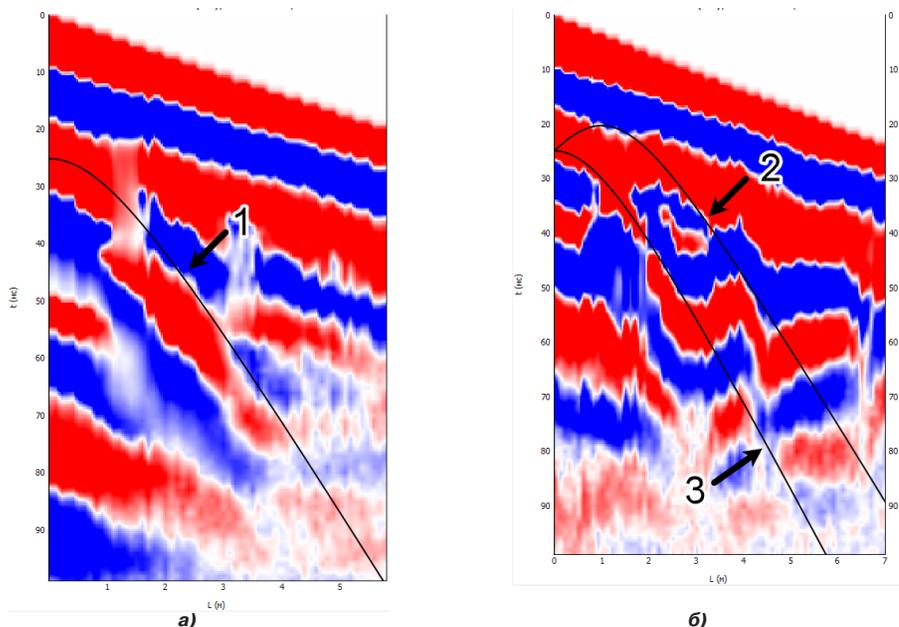


Рис. 9. Радарограммы, полученные при георадарном зондировании на переменной базе: а – первый участок, б – второй участок; 1, 2, 3 – гиперболические годографы отражённых волн (составлено авторами).

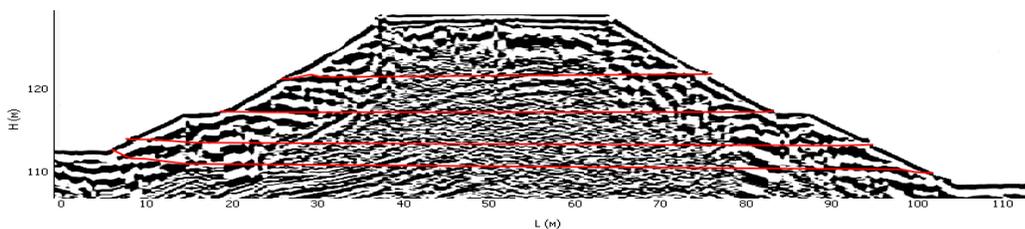


Рис. 10. Пример обработки поперечного профиля насыпи высотой 17 м. Приведено разделение разреза на границы с близкими скоростными характеристиками (выполнено авторами).

условиях. Планируется также использовать радиометки, заложенные в земляное полотно в момент его сооружения.

ВЫВОДЫ

Метод георадиолокации применяется для обследования объектов транспортной инфраструктуры достаточно широко. Задачи, решаемые этим методом, разнообразны, поэтому возникает необходимость разработки новых подходов к их решению. Предлагаемая методика определения скоростей распространения радиоволн в грунтах в «слепых зонах» позволяет получить скоростные характеристики грунтов в откосных зонах насыпей. Площадь таких зон может составлять до 60 % общей площади поперечного сечения насыпи, в зависимости от крутизны заложения откосов.

Разработанная методика не только расширяет сферу применения георадарного обследования, но и позволяет рассчитать значения скоростных характеристик грунтов в откосных зонах. Более достоверная и качественная информация, полученная в результате применения геофизических и традиционных методов обследования, работает на повышение качества принимаемых проектных решений, обеспечение прочности и надёжности объектов транспортной инфраструктуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Владов М. Р., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию. – М.: Издательство МГУ, 2004. – 153 с. [Электронный ресурс]: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-vladov-ml-starovojtov-av-vvedenie-v-georadiolokaciyu-mmgu-2004rutk155sgsp.pdf>. Доступ 26.10.2020.

2. Пупатенко В. В., Сухобок Ю. А. Литологическое расчленение разреза по данным георадиолокации // Мир транспорта. — 2013. — № 3. — С. 154–161. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/395>. Доступ 26.10.2020.

3. Pupatenko, V. V., Sukhobok, Y. A., Stoyanovich, G. M. Lithological Profiling of Rocky Slopes using GeoReader Software Based on the Results of Ground Penetrating Radar Method. *Procedia Engineering, Transportation Geotechnics and Geocology, TGG 2017*, Saint Petersburg, Russia, 2017, Vol. 189, pp. 643–649. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/317192027_Lithological_Profiling_of_Rocky_Slopes_using_GeoReader_Software_Based_on_the_Results_of_Ground_Penetrating_Radar_Method/fulltext/592c1845a6fdcc44435e788d/Lithological-Profiles-of-Rocky-Slopes-using-GeoReader-Software-Based-on-the-Results-of-Ground-Penetrating-Radar-Method.pdf. Доступ 26.10.2020. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.102.

4. Pupatenko, V. V., Sukhobok, Y. A., Stoyanovich, G. M., Stetsyuk, A. E., Verkhovtsev, L. R. GPR data interpretation in the landslides and subgrade slope surveys. *Selected issues, MATEC Web of Conferences*, 2019, Vol. 265, 03003. [Электронный ресурс]: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2019/14/mateconf_gccets2018_03003.pdf. Доступ 26.10.2020. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926503003>.

5. Стоянович Г. М., Пупатенко В. В., Сухобок Ю. А. Поиск погребённых льдов методом георадиолокации при реконструкции железных дорог // Второй Международный симпозиум земляного полотна в холодных регионах: Материалы симпозиума (Новосибирск, 24–26 сентября 2015 г.) / Под ред. проф. А. Л. Исакова и проф. Ц. К. Лю. — Новосибирск: СГУПС, 2015. — С. 78–83. [Электронный ресурс]: <https://drive.google.com/file/d/1sCvvgXDsUwAjwKmKvPCc1HqEEK9kK98Q/view>. Доступ 26.10.2020.

6. *Ground Penetrating Radar*. Ed. by David J. Daniels. London, The Institution of Electrical Engineers, 2004, 734 p. DOI: 10.1049/PBRA015E.

7. Вопросы подповерхностной радиолокации: Коллективная монография / Под ред. А. Ю. Гринева. — М.: Радиотехника, 2005. — 416 с. [Электронный ресурс]: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-grinev-ayu-red-voprosy-podpoverxnostnoj-radiolokacii-mradiotekhnika-2005ruk3.pdf>. Доступ 26.10.2020.

8. Попов С. В. Определение диэлектрической проницаемости по годографам дифрагированных волн в рамках модели наклонно-слоистой среды // Криосфера Земли. — 2017. — Т. XXI. — № 3. — С. 83–87. [Электронный ресурс]: <https://docplayer.ru/85796845-Opređenje-dielektričeskoj-pronicaemosti-po-godografam-difragirovannyh-voln-v-ramkah-modeli-naklonno-sloistoy-sredy.html>. Доступ 26.10.2020.

9. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Ed. by H. M. Jol. Amsterdam, Elsevier Science, 2009, 508 p. [Электронный ресурс]: <http://bookfi.net/book/698213>. Доступ 26.10.2020.

10. Старовойтов А. В. Интерпретация георадиолокационных данных: Учебное пособие. — М.: Издательство МГУ, 2008. — 192 с. [Электронный ресурс]: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-interpretaciya-georadiolokacionnyh-dannyh.pdf>. Доступ 26.10.2020.

11. Бричева С. С. Разработка методики изучения криогенных объектов при помощи георадиолока-

ции // Дис... на соискание учёной степени канд. геолого-минерал. наук. — М.: Издательство МГУ, 2018. — 169 с. [Электронный ресурс]: <https://istina.msu.ru/download/102445811/1f4myB:4rMolfBksN6A7nUkgfjcfLhA50g/>. Доступ 26.10.2020.

12. Forte, E., Pipan, M. Review of multi-offset GPR applications: Data acquisition, processing and analysis. *Signal Processing*, 2017, Vol. 132, pp. 210–220. [Электронный ресурс]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165168416300494?via%3Dihub>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.04.011>. Доступ 26.10.2020.

13. Dix, C. Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics*, 1955, Vol. 20, No. 1, pp. 68–86. [Электронный ресурс]: <https://ru.scribd.com/document/260551160/Seismic-Velocities-From-Surface-Measurements-C-Hewitt-Dix>. Доступ 26.10.2020.

14. Сейсморазведка: Справочник геофизика / Под ред. И. И. Гурвича, В. П. Номоконова. — М.: «Недра», 1981. — 464 с. [Электронный ресурс]: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-seismorazvedka-spravochnik-geofizikapod-red-gurvicha-nomokonovamnedra.djv>. Доступ 26.10.2020.

15. Forte, E., Dossi, M., Pipan, M., Colucci, R. R. Velocity analysis from common offset GPR data inversion: theory and application to synthetic and real data. *Geophysical Journal International*, 2014, No. 297, pp. 1471–1483. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/profile/Renato_Colucci2/publication/262980200_Velocity_analysis_from_common_offset_GPR_data_inversion_Theory_and_application_to_synthetic_and_real_data/links/559be0c408ae0035df2336dc/Velocity-analysis-from-common-offset-GPR-data-inversion-Theory-and-application-to-synthetic-and-real-data.pdf. DOI: 10.1093/gji/ggu103. Доступ 26.10.2020.

16. Saarenketo, T., Scullion, T. Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, Vol. 43, No. 2–4, pp. 119–138. [Электронный ресурс]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092698519900052X?via%3Dihub>. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00052-X). Доступ 26.10.2020.

17. Сухобок Ю. А., Курбатов М. С. Программный комплекс для информационного моделирования георадарных данных GeoReader // САПР и ГИС автомобильных дорог. — 2019. — № 2 (13). — С. 26–31. [Электронный ресурс]: [http://www.cadgis.ru/2019/13/CADGIS-2019-2\(13\)-04.Sukhobok-Kurbatov\(GeoReader\).pdf](http://www.cadgis.ru/2019/13/CADGIS-2019-2(13)-04.Sukhobok-Kurbatov(GeoReader).pdf). DOI: 10.17273/CADGIS.2019.2.4. Доступ 26.10.2020.

18. Yilmaz, O. *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, 2001, Vol. 1, 1028 p. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.9781560801580>. Доступ 26.10.2020.

19. Warren, C., Giannopoulos, A., Giannakis, I. *gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for ground penetrating radar*. *Computer Physics Communications*, 2016, Vol. 209, pp. 163–170. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/profile/Antonios_Giannopoulos2/publication/308044720_gprMax_Open_source_software_to_simulate_electromagnetic_wave_propagation_for_Ground_Penetrating_Radar/links/57eb070208ae5d93a4815e1b/gprMax-Open-source-software-to-simulate-electromagnetic-wave-propagation-for-Ground-Penetrating-Radar.pdf. DOI: 10.1016/j.cpc.2016.08.020. Доступ 26.10.2020.

Публикация осуществлена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

