

Журнал основан в 1972 г. Юрием Андреевичем Ждановым

Главная редакция:

А.В. Белоконь (главный редактор), А.В. Павленко, Е.Г. Гежа, В.С. Золотарев (заместители главного редактора),
Н.И. Безверхая (ответственный секретарь)

Редакционный совет:

В.Г. Захаревич, Т.А. Исмаилов, В.Г. Передерий, А.А. Петрик, Ю.Ф. Росляков,
В.И. Русаков, А.А. Рыжкин, Б.М. Синельников, В.И. Шумейко

Редакционная коллегия:

А.В. Павленко (председатель редколлегии, д-р техн. наук, проф.), М.Э. Шошиашвили (заместитель председателя редколлегии, д-р техн. наук, проф.), М.М. Батдалов (д-р техн. наук, проф.), В.А. Волосухин (д-р техн. наук, проф.), А.И. Волчков (канд. техн. наук, доц.), П.П. Гайджуrow (д-р техн. наук, проф.), А.Н. Гуда (д-р техн. наук, проф.), Ю.Г. Дорофеев (д-р техн. наук, проф.), В.Ф. Ермаков (д-р техн. наук, проф.), Н.Н. Ефимов (д-р техн. наук, проф.), В.Л. Заковоротный (д-р техн. наук, проф.), А.П. Зубехин (д-р техн. наук, проф.), В.В. Иванов (д-р техн. наук, проф.), Н.И. Калоев (д-р техн. наук, проф.), И.А. Каляев (чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф.), Н.И. Каргин (д-р техн. наук, проф.), В.Н. Козлов (д-р техн. наук, проф.), Ю.М. Косиченко (д-р техн. наук, проф.), В.И. Лачин (д-р техн. наук, проф.), Н.Н. Лябах (д-р техн. наук, проф.), В.И. Нагай (д-р техн. наук, проф.), В.Т. Прохоров (д-р техн. наук, проф.), И.Н. Рождов (канд. техн. наук, проф.), А.П. Савостьянов (д-р техн. наук, проф.), А.М. Семенихин (д-р техн. наук, проф.), Н.И. Сысоев (д-р техн. наук, проф.), Л.Е. Ткаличева, А.Я. Третьяк (д-р техн. наук, проф.), Е.И. Фандеев (д-р техн. наук, проф.), И.К. Хузмиев (д-р экон. наук, проф.), А.П. Частиков (д-р техн. наук, проф.), В.А. Шилов (д-р техн. наук, проф.)

Учредители:

Министерство образования и науки Российской Федерации, Дагестанский государственный технический университет, Дагестанский государственный университет, Донской государственный технический университет, Кабардино-Балкарский государственный университет, Кубанский государственный технологический университет, Кубанский государственный университет, Пятигорский государственный лингвистический университет, Ростовский государственный строительный университет, Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростовский государственный экономический университет, Северо-Кавказская академия государственной службы, Северо-Кавказский государственный технический университет, Северо-Осетинский государственный университет, Южно-Российский государственный технический университет (НПИ), Южный федеральный университет

Над номером работали: Е.В. Великих, В.И. Литвиненко, Л.Е. Ткаличева

Подписано к печати 10.02.2012 г.

Выход в свет 20.02.2012 г. Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 16,27. Уч.-изд. л. 22,00.

Тираж 200 экз. Заказ № 48-4139.

Адрес редакции и издателя: 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105,
Южный федеральный университет, тел. (863) 264-05-00, (863) 264-57-37; факс (863) 264-57-37;
E-mail: izvestiya@sfedu.ru.

Адрес редколлегии серии «Технические науки»: 346428, г. Новочеркасск,
ул. Просвещения, 132, тел. (факс) (8635) 25-53-91.
E-mail: technauka_novoch@mail.ru

Адрес типографии: 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

**Журнал выходит при участии Майкопского государственного технологического университета
и Таганрогского института управления и экономики**

УДК 53: 550.8 + 06

ОЦЕНКА СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ПО ДАННЫМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБСЛЕДОВАНИЙ

© 2012 г. А.В. Морозов, А.А. Крушин, К.Ю. Кислица, З.Б. Хакиев, В.А. Явна, В.А. Востров

Ростовский государственный университет
путей сообщенияRostov State Transport
University

Предложен метод оценки влажности грунтов земляного полотна, изменяющейся при разовом выпадении осадков и при сезонных изменениях погодных условий. Предложенный метод включает методику обработки георадиолокационных данных и теоретические методики определения диэлектрической проницаемости и удельной проводимости. Применение указанного метода при обследовании участков железнодорожного пути позволяет оценить изменения влажностного состояния балластного слоя и подстилающих грунтов земляного полотна в процессе воздействия на них природно-климатических факторов.

Ключевые слова: георадиолокация; обследование земляного полотна; сезонные изменения; диэлектрическая проницаемость; радарограмма.

In this work the method of assessing moisture content of subgrade is proposed. The moisture is changing by the occasional rainfall and seasonal weather changes. The proposed method includes a technique of processing GPR data and theoretical methods for determining: the permeability and conductivity. Application of this method to survey of railway sections allows us to estimate changes in moisture state of ballast and subgrade during influence on them of climatic factors.

Keywords: GPR; a survey of roadbed; seasonal changes; permeability; radiogram.

Земляное полотно – важнейший элемент нижнего строения железнодорожного пути, и проблемы его стабильности актуальны для железных дорог всех стран мира. Его деформации оборачиваются дорогостоящими затратами, связанными с ограничениями скорости движения поездов, восстановлением и реконструкцией.

Для решения задачи стабилизации земляного полотна необходимо располагать постоянной и объективной информацией о его состоянии. Как показывает практика, надзор, основанный преимущественно на визуальном контроле, зачастую оказывается малоэффективным. В связи с этим особую актуальность приобретает диагностика и надзор с использованием современных контрольно-измерительных и диагностических средств, а также комплексного и комбинаторного анализа получаемой информации [1].

Особое место в этих средствах занимает метод георадиолокации [2], позволяющий получать непрерывную информацию о состоянии грунтовых слоев как в режиме детальной диагностики, так и в скоростном режиме с использованием специализированных измерительных средств [3]. Вместе с этим метод георадиолокации, как неразрушающий метод определения свойств грунтов, необходимо использовать в комплексе с другими геофизическими методами. Наиболее достоверную информацию о состоянии грунта удается получить в случаях, когда комплекс включает такие методы обследований, как пенетрацию или бурение с отбором проб грунтов для дальнейшего лабораторного изучения их свойств.

Использование георадиолокации без подключения комплексов альтернативных геофизических методов позволяет качественно решать только ограниченный круг задач. К ним обычно относят задачи выявления и оконтуривания аномальных областей грунта и профилирования грунтовых слоев [4]. В последнее время появились исследования по применению метода георадиолокации для контроля качества строительных конструкций [5] и объектов инфраструктуры железнодорожного пути [6], основанные на корреляции электрофизических и прочностных свойств материалов [7].

Существенное расширение спектра задач, решаемых методом георадиолокации, связано с применением математических методов обработки сигналов. Разработанные методики позволяют уточнять амплитудные, частотные и фазовые характеристики отраженных сигналов [8] и, в конечном счете, получать дополнительную информацию о состоянии грунта [9].

Скоростной режим георадиолокационных обследований протяженных участков железнодорожного пути [10], широко применяемый на железных дорогах мира, позволяет получать большие объемы информации, требующие интерпретации высокого качества [11]. Естественно, применять комплексы геофизических методов, в объемах, диктуемых протяженностью сети железных дорог, нерационально в связи с требуемыми материальными затратами. Это обстоятельство повышает актуальность исследований по расширению круга задач, решаемых методом георадиолокации вне рамок геофизических комплексов. Данная

работа посвящена разработке метода оценки влажности грунтов земляного полотна, изменяющейся при разном выпадении осадков и при сезонных изменениях погодных условий.

1. Экспериментальные исследования

Для исследования влияния сезонных погодных факторов на возможности оценки состояния грунтов земляного полотна георадиолокационные измерения проведены в декабре 2009 г., мае и сентябре 2010 г. Для обследований выбраны однопутные участки пути на перегоне Туапсе – Сочи (1884 км – 1963 км) Северо-Кавказской железной дороги. Измерения выполнены в осевом сечении железнодорожного пути с использованием антенного блока с центральной частотой 400 МГц, размещенного на вагоне-дефектоскопе. Высота подвеса антенного блока над поверхностью балласта составляет 0,35 м, что обеспечивает значения угла падения луча равным примерно 15°. Развертка выбрана равной 48 нс. Трасса радарограммы содержала $N = 512$ точек.

2. Теоретические подходы к количественной обработке радарограмм

Для простоты рассмотрения ограничимся случаем нормального падения электромагнитного излучения на границу грунтового слоя.

2.1. Величина отраженного сигнала от верхней границы грунтового слоя

Напряженность электрического поля сигнала, отраженного от верхней поверхности грунтового слоя определяется соотношением [12]:

$$E = E_0 \frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{\sqrt{\epsilon} + 1},$$

где E , E_0 – соответственно величина напряженности электрического поля отраженного и падающего сигнала; ϵ – диэлектрическая проницаемость среды.

Обозначим E' напряженность электрического поля сигнала, отраженного верхней поверхностью грунта при изменении его влажности. Тогда отношение величин сигналов определится соотношением

$$A = \frac{E'}{E} = \frac{(\sqrt{\epsilon'} - 1)(\sqrt{\epsilon} + 1)}{(\sqrt{\epsilon'} + 1)(\sqrt{\epsilon} - 1)},$$

откуда можно получить

$$\sqrt{\epsilon'} = \frac{-\sqrt{\epsilon}(A+1) + (A-1)}{\sqrt{\epsilon}(A-1) - (A+1)}. \quad (1)$$

С другой стороны, изменение влажности грунта приводит к изменению скорости распространения сигнала. В приближении нормального падения электромагнитного излучения на поверхность грунтового слоя пройденный путь (h) до границы раздела со вторым грунтовым слоем определится соотношениями:

$h = \frac{\tau m c}{\sqrt{\epsilon}}$ или $h = \frac{\tau m' c}{\sqrt{\epsilon'}}$, где τ – развертка радарограммы во временной области, m и m' – видимая

толщина слоя, выраженная в точках трассы радарограммы, полученной при разных значениях влажности; c – скорость света в вакууме. Приравняв величины h , получим второе уравнение, связывающее диэлектрические проницаемости сред

$$\epsilon' = \epsilon \left(\frac{m'}{m} \right)^2. \quad (2)$$

2.2. Связь коэффициента поглощения и удельной проводимости среды

Ограничим рассмотрение немагнитными средами ($\mu = 1$). Значение коэффициента поглощения определим согласно [12] в СИ:

$$p = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ -\epsilon + \sqrt{\epsilon^2 + \frac{\mu_0^2 c^4 \sigma^2}{\omega^2}} \right\}},$$

где ω – центральная круговая частота излучения; c – скорость света в среде; ϵ – диэлектрическая постоянная среды; μ_0 – магнитная постоянная; σ – удельная проводимость среды.

Для малых σ , допускающих преобразование,

$$\epsilon \sqrt{1 + \frac{\mu_0^2 c^4 \sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}} = \epsilon \left(1 + \frac{\mu_0^2 c^4 \sigma^2}{2\omega^2 \epsilon^2} \right),$$

коэффициент поглощения сводится к выражению

$$p = \frac{\mu_0 c \sigma}{2\sqrt{\epsilon}}.$$

Применяя последнее уравнение к грунтам разной влажности, можно получить

$$\sigma' = 2\sqrt{\epsilon'} \frac{p' - p}{\mu_0 c} + \frac{\sqrt{\epsilon'}}{\sqrt{\epsilon}} \sigma, \quad (3)$$

где σ и σ' – удельные проводимости грунта при разной влажности.

2.3. Связь диэлектрической проницаемости и удельной проводимости среды

Выражение для показателя преломления среды [12] имеет вид:

$$n = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \epsilon + \sqrt{\epsilon^2 + \frac{\mu_0^2 c^4 \sigma^2}{\omega^2}} \right\}}.$$

Как и ранее, ограничимся рассмотрением сред с малой удельной проводимостью, тогда

$$n = \sqrt{\epsilon \left(1 + \frac{\mu_0^2 c^4 \sigma^2}{4\epsilon^2 \omega^2} \right)} \quad \text{или} \quad \epsilon' = \epsilon + \frac{\mu_0^2 c^4 \sigma^2}{4\epsilon \omega^2}. \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет связать удельные проводимости сред с разной влажностью:

$$\sigma'^2 = (\epsilon' - \epsilon) \epsilon' \frac{4\omega^2}{\mu_0^2 c^4} + \frac{\epsilon'}{\epsilon} \sigma^2. \quad (5)$$

Система изменения проницаемости его вла

2.4. Величина отраженного сигнала от границы слоя

Электромеханическая в грунтовой среде его нижней границе зависит от диэлектрических образующих

Рассчитав коэффициент отражения на границе раздела грунта с падающей волной интенсивности отражения от границы распространения

трического поля

диэлектрической

При расчете затухания от диэлектрической среды от границы распространения

$E =$

Далее изменение в среде от верхней емкостной антенны электрической

$E =$

Определены значения от влажности

тогда

Из этого

$\sqrt{\epsilon'}$

Система уравнений (3), (5) позволяет определить изменение проводимости грунтового слоя при изменении его влажности.

2.4. Величина отраженного сигнала от нижней границы слоя земляного полотна

Электромагнитное излучение, распространяющееся в грунтовом слое, будет испытывать отражение от его нижней границы. Величина отраженного сигнала зависит от диэлектрических проницаемостей грунтов, образующих границу раздела.

Рассчитаем величину сигнала, отраженного нижней границей грунтового слоя. Исходим из того, что на грунт падает электромагнитное излучение одинаковой интенсивности E_0 . Тогда, после частичного отражения от верхней границы слоя, в среде будет распространяться излучение с напряженностью электрического поля, равной: $E = E_0(1 - \frac{\sqrt{\epsilon_1} - 1}{\sqrt{\epsilon_1} + 1})$, где ϵ_1 – диэлектрическая проницаемость грунтового слоя.

При распространении в грунте излучение будет затухать, отражаться от нижней поверхности слоя с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 и после отражения от нижней поверхности напряженность электрического поля сигнала определится соотношением:

$$E = E_0(1 - \frac{\sqrt{\epsilon_1} - 1}{\sqrt{\epsilon_1} + 1}) e^{-p_1 h_1} \left| \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}} \right|.$$

Далее излучение еще один раз испытывает затухание в среде и ослабляется отражением части энергии от верхней границы грунта. Окончательно в приемную антенну попадает сигнал с напряженностью электрического поля, равной

$$E = E_0 \left(1 - \frac{\sqrt{\epsilon_1} - 1}{\sqrt{\epsilon_1} + 1} \right)^2 e^{-2p_1 h_1} \left| \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}} \right|.$$

Определим отношение величин сигналов, отраженных от нижней границы слоя грунта при изменении влажности грунта $A = \frac{E'}{E}$. Обозначим

$$\alpha = \frac{\left(1 - \frac{\sqrt{\epsilon_1} - 1}{\sqrt{\epsilon_1} + 1} \right)^2 e^{-2p_1 h_1}}{\left(1 - \frac{\sqrt{\epsilon'_1} - 1}{\sqrt{\epsilon'_1} + 1} \right)^2 e^{-2p'_1 h_1}},$$

тогда
$$A \alpha \left| \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}} \right| = \left| \frac{\sqrt{\epsilon'_2} - \sqrt{\epsilon'_1}}{\sqrt{\epsilon'_2} + \sqrt{\epsilon'_1}} \right|.$$

Из этой формулы можно получить

$$\sqrt{\epsilon'_2} = \frac{-\sqrt{\epsilon'_1} \sqrt{\epsilon_2} (A\alpha + 1) + \sqrt{\epsilon_1} \sqrt{\epsilon'_1} (A\alpha - 1)}{(\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}) A\alpha - (\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1})}. \quad (6)$$

3. Применение разработанной методики к обследованию земляного полотна железнодорожного пути

Предварительная обработка всех радарограмм выполнена по следующей методике:

– среди радарограмм, полученных при обследованиях, выбраны радарограммы, содержащие информацию о 1928 – 1932 км Сочинской дистанции пути Северо-Кавказской железной дороги (рис. 1);

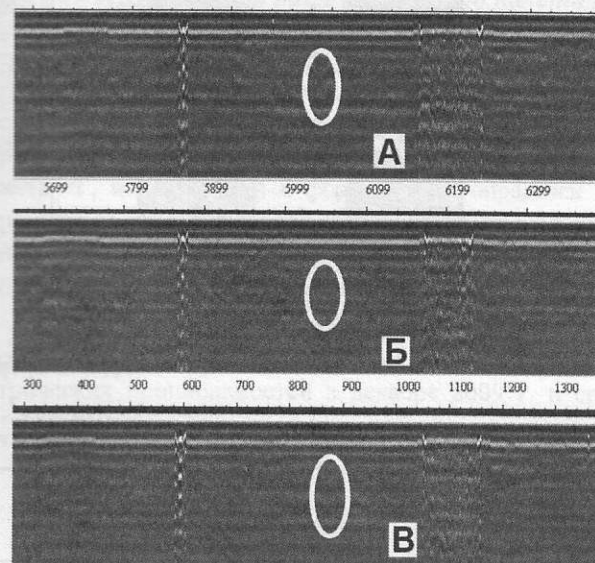


Рис. 1. Радарограммы после совмещения характерных особенностей. Время обследования: А – декабрь 2009 г., Б – май 2010 г., В – сентябрь 2010 г.

– используя привязку к пикетной системе координат и характерные особенности георадиолокационных разрезов, выделены фрагменты радарограмм, относящиеся к одному участку пути. В данной работе выделены фрагменты, относящиеся к пути длиной 100 м, содержащие особенность, отмеченную эллипсом на рис. 1;

– проведено усреднение выделенного фрагмента радарограммы (рис. 2А, радарограмма получена в сентябре 2010 г.), результат которого представлен на рис. 2Б. В процессе преобработки радарограмм диэлектрическая проницаемость среды принята равной 4,5;

– к усредненному фрагменту радарограммы (рис. 2Б) применено преобразование Гильберта [13] – результат приведен на рис. 2В;

– удалена часть радарограммы, не относящаяся к грунтовой среде (рис. 2Д). Область огибающей выше позиции a на рис. 2Г соответствует сигналу прямого прохождения и сигналу, прошедшему по воздуху и отраженному от поверхности исследуемой среды. На рис. 2Е приведена трасса радарограммы, изображенной на рис. 2Д, после применения указанной процедуры;

– проведена нормировка полученных трасс по максимальному значению амплитуды, таким образом, что сигналы сопоставляемых радарограмм имеют одинаковое значение в первом отсчете (амплитуды сигналов представлены в строках 1 – 3 таблицы).

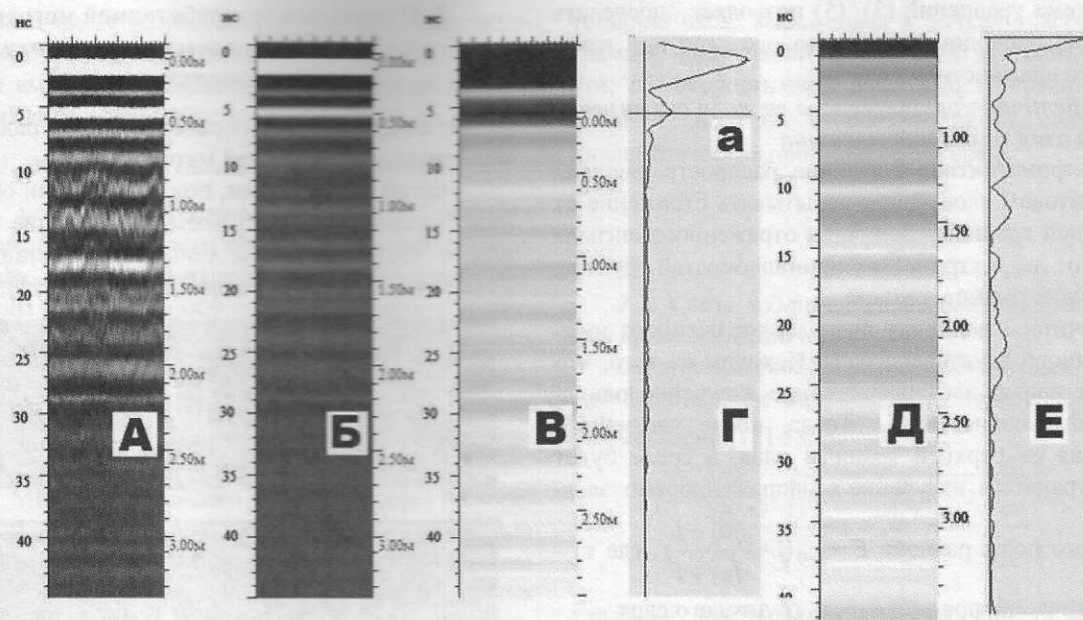


Рис. 2. Обработка фрагмента радарограммы, приведенной на рис. 1В

Исходные параметры и результаты расчетов

№	Параметр	Декабрь, 2009 г.	Май, 2010 г.	Сентябрь, 2010 г.
1	Величина сигнала прямого прохождения, о. е.	6419	6214	7061
2	Отношение сигналов прямого прохождения	1,1	1,15	1,00
3	Величина нормированных сигналов («А _Е » на рис. 3), о. е.	7560	7157	6792
4	Параметр А для формулы (1) (отношение величин сигналов А _Е , рис. 3)	1,11	1,05	1,00
5	Номер точки трассы, характеризующей положение границы раздела грунтовых слоев (величина «а _н », рис. 3)	26	25	24
6	Диэлектрическая проницаемость балластного слоя (результат расчета по формулам (1) и (2))	4,7	4,3	4,0
7	Оценка изменения влажности балластного материала (расчет по формуле (7)), %	0,9	0,4	0
8	Коэффициент затухания сигнала в балластном слое	6,39	6,56	6,27
9	Удельная проводимость балластного слоя, См/м	0,44	0,42	0,40
10	Оценка изменения влажности балластного материала (расчет по формуле (8)), %	0,6	0,3	0,0
11	Величина нормированных сигналов («Б _Е » на рисунке 3), отн. ед.	2400	1256	1388
12	Параметр А для формулы (6) (отношение величин сигналов Б _Е , рис. 3)	1,72	1,0	1,0
13	Номер точки трассы, характеризующей положение границы раздела грунтовых слоев (величина «б _н », рис. 3)	44	40	38
14	Диэлектрическая проницаемость грунтового слоя (результат расчета по формулам (2) и (6))	6,0	4,9	4,4
15	Оценка изменения влажности верхней части земляного полотна (расчет по формуле (7)), %	2,1	0,7	0

На рис. 3 приведены трассы радарограмм, полученные в разные периоды и обработанные по указанной выше методике. Здесь А_Е – амплитуда нормированных сигналов; а_н – номер точки в трассе, характеризующей

положение границы раздела грунтовых слоев; Б_Е и б_н – амплитуда нормированных сигналов в точках трассы, характеризующих положение следующей границы раздела грунтовых слоев соответственно.

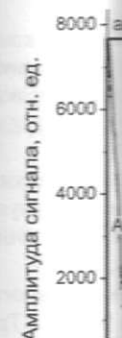


Рис. 3.

3.1. Обработка

Первый путь выбора сигнала – это путь, который имеет наименьшую амплитуду сигнала. В электрической балластной системе у диэлектрической среды в сентябре 2010 г. в строках 4 трассы 4 электрической системы вставлять п

Получение вла

обоснованные результаты. Имеющиеся в балластном слое его за

3.2. Результаты

Рассчитаны коэффициенты затухания сигнала в балластном слое. Результаты расчета затухания сигнала в балластном слое. Результаты расчета затухания сигнала в балластном слое. Результаты расчета затухания сигнала в балластном слое.

Результаты для 2009 г. и 2010 г. Учитывая электрические параметры, окончательные значения вла

Результаты

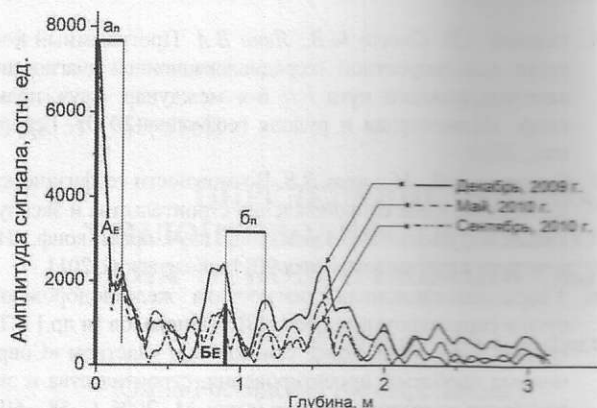


Рис. 3. Трассы радарограмм, обработанные согласно приведенной в разделе 3 методике

3.1. Отражение от верхней поверхности грунта

Первый слой в конструкции железнодорожного пути выполнен из балластного материала, изнашивающегося и загрязняющегося в процессе эксплуатации пути. Для оценки влияния сезонных изменений на электрические свойства и влажностное состояние балластного слоя железнодорожного пути решена система уравнений (1) и (2) для случая сопоставления диэлектрических проницаемостей в декабре 2009 г. и сентябре 2010 г. Необходимые для решения параметры A и n , а также результаты расчета приведены в строках 4 – 6 таблицы. Видно, что изменение диэлектрической проницаемости в течение года может составлять примерно 20 %.

Полученные результаты позволяют оценить изменение влажности Δw по формуле

$$\varepsilon' = \varepsilon + \Delta \varepsilon_w, \quad (7)$$

обоснованной в [14] для малых влажностей w . Результаты расчетов приведены в строке 7 таблицы. Имеющие место незначительные изменения влажности балластного слоя могут объясняться малой степенью его загрязнения на обследуемом участке пути.

3.2. Расчет удельной проводимости щебеночного слоя

Расчеты выполнены решением системы уравнений, состоящей из формул (3) и (5). Требуемые коэффициенты затухания приведены в строке 8 таблицы и определены методом экспоненциальной аппроксимации затухающей части сигнала, зарегистрированного приемной антенной с глубин до 0,65 м, что соответствует толщине балластного слоя [14]. Требуемая для решения системы уравнений частота определена как максимальная частота Фурье разложения соответствующих радарограмм и оказалась равной 330 МГц.

Результаты расчета представлены в строке 9 таблицы для случая сравнения проводимости в декабре 2009 г. и сентябре 2010 г.

Учитывая линейный характер зависимости диэлектрической проницаемости от влажности [14], окончательно получим выражение для оценки изменения влажности Δw

$$\Delta w = \frac{\mu_0^2 c^4 (\sigma'^2 - \sigma^2)}{4 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \omega^2}. \quad (8)$$

Результаты расчета, приведенные в строке 10 таб-

лицы, хорошо согласуются с результатами, приведенными в строке 7 данной таблицы. Таким образом, получены близкие значения влажности балластного слоя при применении формул (7) и (8), что в свою очередь может говорить о целесообразности использования данных методик для выявления переувлажненных зон в процессе диагностики инженерных объектов транспортной инфраструктуры.

3.3. Сезонные изменения физических характеристик верхней части разреза земляного полотна

Для оценки влияния сезонных изменений на электрические свойства верхней части земляного полотна железнодорожного пути решена система уравнений, состоящая из (2) и (6). Необходимые для решения параметры приведены в строках 11–13 таблицы. Параметр α , используемый в формуле (6), определен по расчетным значениям коэффициента затухания p и принятой диэлектрической проницаемости ε для толщины балластного слоя $h_1 = 0,65$ м, оказался равным $\alpha = 1,32$.

На рис. 4 приведено графическое решение этой системы уравнений для случая сопоставления диэлектрических проницаемостей в декабре 2009 г. и сентябре 2010 г.

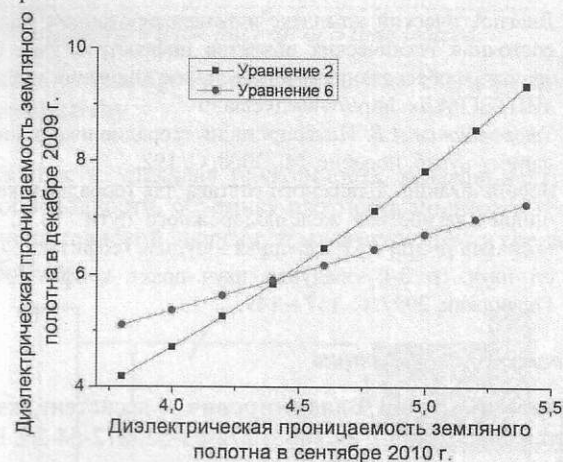


Рис. 4. Расчет диэлектрической проницаемости верхней части разреза земляного полотна

Результаты расчета диэлектрической проницаемости (строка 14, таблица) позволяют оценить сезонное изменение влажности (строка 15, таблица). Из приведенных данных можно сделать вывод о том, что на рассмотренном участке пути сезонное изменение влажности верхней части разреза подбалластного основания составляет 2 %, что, при дополнительном анализе гидрологических данных, может служить мерой оценки качества работы водоотводных сооружений (канавы, дренажи и пр.).

Выводы

Разработан метод определения сезонного изменения электрофизических свойств грунтовых слоев с использованием георадиолокации, который можно использовать без данных комплекса геофизических методов. Предложенный метод включает методику обработки георадиолокационных данных и теоретические методики определения:

– диэлектрической проницаемости слоев по величине отраженного сигнала и его «кажущейся» толщине;
– удельной проводимости грунтовых слоев по коэффициенту затухания и диэлектрической проницаемости;

– изменения влажности грунтовых слоев по изменению удельной проводимости;

– электрофизических свойств подстилающих грунтов с учетом затухания электромагнитного излучения в расположенных выше грунтовых слоях.

Применение указанного метода к обследованию участка пути позволило оценить диэлектрическую проницаемость балластного материала, необходимую для корректного профилирования нижней границы балластной призмы.

Вместе с тем оценка изменения влажности балластного слоя позволяет судить о степени загрязненности балластного материала.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, гос. контракт №16.513.11.3125.

Литература

1. Диагностический комплекс автоматизированной оценки состояния технических объектов инфраструктуры, связанных с обеспечением безопасности движения поездов «ИНТЕГРАЛ». <http://www.tvema.ru>
2. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных: учеб. пособие. М., 2008. С. 192.
3. Использование подвижного состава для георадиолокационной диагностики железнодорожного пути / В.И. Колесников [и др.] // Инженерная и рудная геофизика-2007: сб. науч. тр. 3-й междунар. науч.-практ. конф. / EAGE Геленджик, 2007. С. 147 – 149.

4. Морозов А.В., Окост М.В., Явна В.А. Программный комплекс для скоростной георадиолокационной диагностики железнодорожного пути // 6-я междунар. науч.-практ. конф. «Инженерная и рудная геофизика-2010». Геленджик, 2010.
5. Капустин В.В., Монахов В.В. Возможности геофизических методов на этапе сопровождения строительства и эксплуатации сооружений // 7-я междунар. науч.-практ. конф. «Инженерная и рудная геофизика-2011». Геленджик, 2011.
6. Георадиолокационная диагностика железнодорожного пути в скоростном режиме / В.Л. Шаповалов [и др.] // Тр. третьей науч.-техн. конф. с междунар. участием «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». М., 2006. С. 58 – 60.
7. Хакиев З.Б. Определение свойств грунта георадиолокационным методом / Тр. третьей всерос. конф. «Радиолокация и радиосвязь». М., 2009. Т. 1. С. 177 – 181.
8. Хакиев З.Б. Некоторые особенности амплитудно-частотных характеристик георадиолокационных трасс в средах с различной проводимостью // Изв. вузов Сев.-Кавк. Естеств. науки. 2009. Т.6. С. 41 – 43.
9. Бахарев А.А., Морозов А.В., Явна В.А. Методика определения характера аномалий, выявленных на радарограмме. // 4-я междунар. науч.-практ. конф. «Инженерная и рудная геофизика-2008». Геленджик, 2008.
10. URL: <http://www.zeticarail.com>, <http://www.idsaustriasia.com>, <http://www.saferailssystem.com>, <http://www.fugro-aperio.com>, <http://www.gssi.ru/>
11. Диагностика балластного слоя георадиолокационным методом / В.Б. Воробьев [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 8. С. 2 – 8.
12. Борн М., Вольф Э. Основы оптики: 2-е изд., перераб. и доп. М., 1973.
13. Конейкин В.В. Первичная обработка георадарных сигналов // URL: <http://www.geo-radar.ru/articles/article3.php>
14. Количественная обработка георадиолокационных данных / А.В. Морозов [и др.] // Вестн. РГУПС. 2011. № 3. С. 96 – 105.

Поступила в редакцию

7 ноября 2011 г.

Морозов Андрей Владимирович – ассистент, кафедра «Физика», Ростовский государственный университет путей сообщения. Тел. (863) 272-63-52, 272-64-20. E-mail: cpd@rgups.ru

Кругликов Александр Александрович – аспирант, кафедра «Путь и путевое хозяйство», Ростовский государственный университет путей сообщения. Тел. (863) 272-64-04. E-mail: cpd@rgups.ru

Кислица Константин Юрьевич – аспирант, кафедра «Физика», Ростовский государственный университет путей сообщения. Тел. (863) 272-64-20. E-mail: cpd@rgups.ru

Хакиев Зелимхан Багаудинович – канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра «Физика», Ростовский государственный университет путей сообщения. Тел. (863) 272-64-20. E-mail: cpd@rgups.ru

Явна Виктор Анатольевич – д-р физ.-мат. наук, кафедра «Физика», Ростовский государственный университет путей сообщения. Тел. (863) 272-63-52, 272-64-20. E-mail: cpd@rgups.ru

Востров Виктор Александрович – лаборант, кафедра «Физика», Ростовский государственный университет путей сообщения. Тел. (863) (863) 272-63-52, 272-64-20. E-mail: cpd@rgups.ru

e-mail: cpd@rgups.ru

Morozov Andrey Vladimirovich – assistant, department «Physics», Rostov State Transport University. Ph. (863) 272-63-52, 272-64-20. E-mail: cpd@rgups.ru

Kruglikov Alexandr Alexandrovich – post-graduate student, department «Track and track facilities», Rostov State Transport University. Ph. (863) 272-64-04. E-mail: cpd@rgups.ru

Kislitca Konstantin Urevich – post-graduate student, department «Physics», Rostov State Transport University. Ph. (863) 272-64-20. E-mail: cpd@rgups.ru

Khakiev Zelimkhan Bagauddinovich – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, assistant professor, department «Physics», Rostov State Transport University. Ph. (863) 272-64-20. E-mail: cpd@rgups.ru

Yavna Victor Anatolyevich – Doctor of Physico-Mathematical Sciences, department «Physics», Rostov State Transport University. Ph. (863) 272-63-52, 272-64-20. E-mail: cpd@rgups.ru

Vostrov Victor Alexandrovich – laboratory assistant, department «Physics», Rostov State Transport University. Ph. (863) 272-63-52, 272-64-20. E-mail: cpd@rgups.ru