

мель, которые бы были привлекательны в качестве местных зон отдыха.

Таким образом, применяемые в настоящее время на разрезах ФРГ технические и организационные решения, должны быть рассмотрены с точки зрения возможности их применения на разрезах Украины. Это позволит отечественным предприятиям по добыче бурого угля выйти из сложной финансовой ситуации и занять передовые позиции в обеспечении производителей электроэнергии собственными энергоносителями, а также обеспечить энергетическую независимость страны в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. www.kommersant.ua. Интернет-газета «Коммерсантъ» Украина, № 175 от 04.10.2006, СР.
2. www.vattenfal.de.

УДК 625.123.033.3

Канд. техн. наук. В.В., Говоруха,
вед. инж. С.А. Лопак
(ИГТМ НАН Украины)

МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА РЕЛЬСОВОГО ПУТИ

Стаття присвячена найбільш сучасним методам діагностики земляного полотна. В статті розглянута техніка та технологія, завдяки якій дається найточніша оцінка стану земляного полотна.

METHODS OF DIAGNOSTICS AND PROGNOSTICATION OF DEFORMATIONS OF EARTHEN LINEN OF RAIL WAY

The article is devoted to the most modern methods of diagnostics of earthen linen. In the article the considered technique and technology due to which the most exact estimation of the state of earthen linen is given.

Как известно, деформации земляного полотна приводят к существенным материальным затратам на восстановительные работы и потерям от перерывов в движении поездов, увеличению расходов на содержание пути, снижают уровень безопасности движения. При этом специальным обследованиям и наблюдениям подвергаются, как правило, те участки, на которых уже были зарегистрированы деформации или какие-либо неисправности земляного полотна. То есть далеко не всегда производится диагностика всех участков земляного полотна, что не дает возможности своевременно выявлять участки земляного полотна, которые подвергаются значительным деформациям [4].

В настоящее время кроме визуального осмотра существует множество методов диагностики земляного полотна:

- 1) инженерно-геологическое бурение;
- 2) динамическое зондирование;
- 3) нивелирование;

- 4) лабораторное физическое моделирование;
- 5) лабораторные и полевые испытания грунтов;
- 6) оценка деформативности подрельсового основания по упругим осадкам пути под нагрузочным поездом;
- 7) специальная обработка лент вагонов-путеизмерителей;
- 8) сейсмический, вибросейсмический, электромагнитный и радиолокационный методы;
- 9) аэрофотосъемка, телевизионная съемка, лазерное сканирование.

Несмотря на такое изобилие методов и средств диагностики, далеко не каждый из них может дать достоверную оценку состояния земляного полотна, так как достаточно сложно дать оценку фактическому состоянию земляного полотна из-за большого разнообразия факторов, влияющих на его стабильную работу (в том числе скрытых, которые проявляются лишь в период неблагоприятных природно-климатических явлений) [7].

Рассмотрим более детально некоторые из методов диагностики земляного полотна.

Технические указания по инструментальной диагностике предусматривают построение продольного профиля земляного полотна с помощью измерительных средств. При этом находить положение основной площадки точечным попикетным бурением с отбором проб грунта весьма трудоемко и дает неточные результаты. Также довольно трудно получить полную и точную информацию о грунтовой среде в продольном и поперечном профилях подбалластной зоны.

При анализе информации полученной с путеизмерительных вагонов ЦНИИ-2, или более современных ЦНИИ-4 после нескольких проходов по изучаемому участку, можно в порядке предварительного диагностирования выявить места с нестабильным земляным полотном. Согласно методике такие участки оценивают скользящим среднеквадратичным отклонением (ССКО). В другом случае применительно к ЦНИИ-4 методика предусматривает выявление нестабильных участков земляного полотна на основе амплитудно-частотных характеристик геометрических параметров верхнего строения пути. При этом признаком деформативности служит локальная просадка колеи, и требуется детально обследовать участок и выявить виды и причины локальных деформаций.

При диагностике земляного полотна рельсового пути передвижной лабораторией инженерно-геологического обследования (ЛИГО), которая оснащена нагрузочным агрегатом НСМ – 18 и измерительно-вычислительным комплексом, положение деформирующихся участков определяется по осциллограммам упругих осадок, получаемых пропуском ЛИГО с нагрузками 10 и 30 тс/ось [2].

Однако одним из наиболее перспективных методов в настоящее время считается метод георадиолокационной диагностики, который позволяет получить непрерывную радарограмму продольного профиля балластного слоя и земляного полотна. Этот метод основан на использовании георадаров им-

пульсного типа с комплексом сменных антенн. При излучении передающей антенной коротких электромагнитных импульсов, проникающих в балластную и грунтовые среды, и приеме отраженных сигналов от границ их раздела, имеющих различные электрофизические свойства, приемная антенна формирует радарограммы, по которым в результате компьютерной обработки можно оценить состояние исследуемой среды (рис. 1).

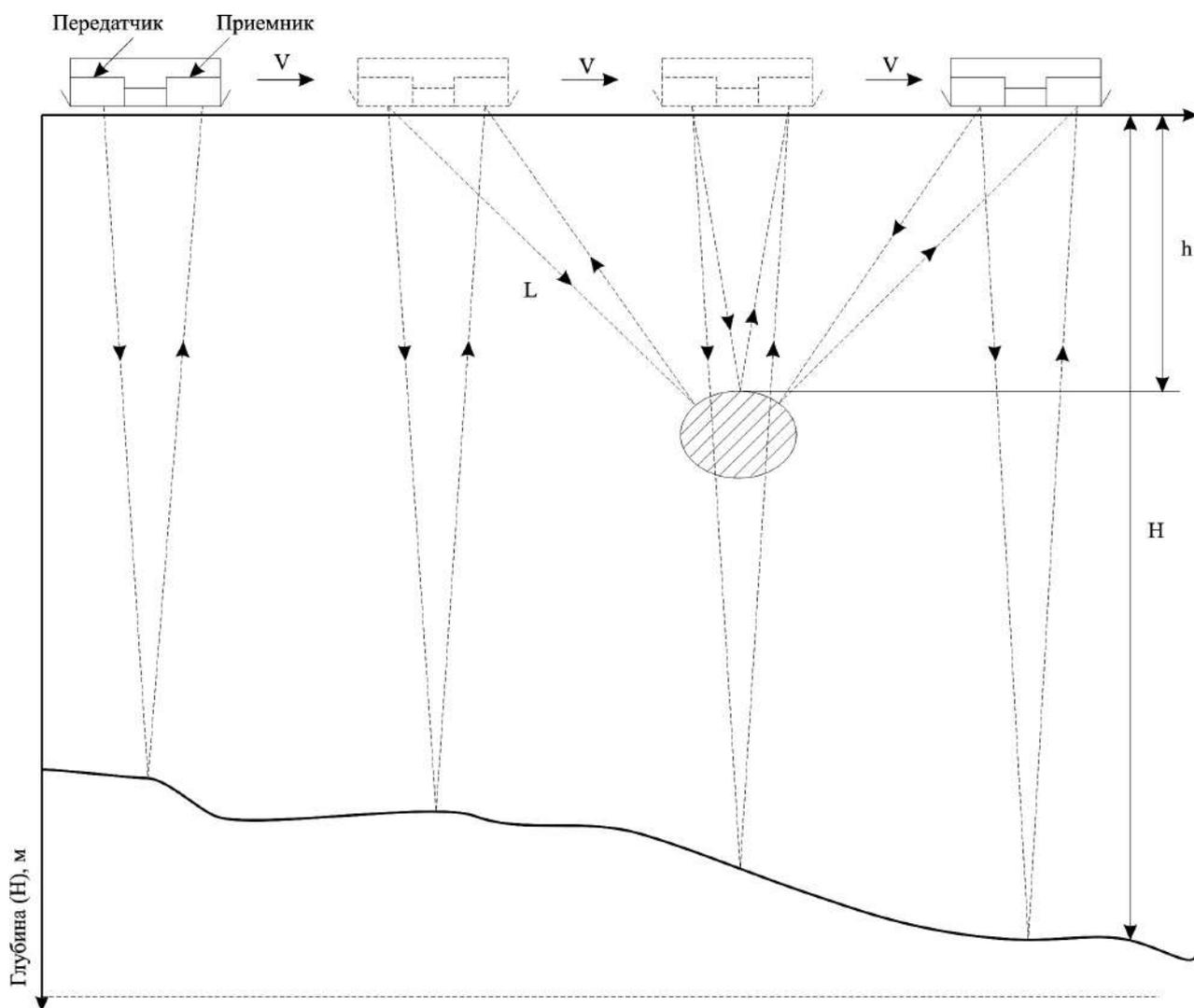


Рис. 1. – Схема проведения зондирования грунта земляного полотна георадаром серии «ОКО»

Первые такие исследования с использованием метода георадиолокационного подповерхностного зондирования проводились в России в МГУ, а практические испытания по диагностике рельсового пути были проведены георадаром «Зонд-12» выполнены во ВНИИЖТе в 1997 году. На основании этих испытаний были составлены «Технические указания по применению георадиолокационного метода для диагностики земляного полотна».

В данный момент различными предприятиями создано несколько моделей георадаров «Zond-12с», «Грот», «Лоза», «ОКО-М» [2].

Наиболее распространены георадары серии «ОКО». Этот радар состоит из

передающего устройства с источником питания; приемной антенны с широкополосным усилителем; блока управления, включающего элементы выборки, хранения, стробоскопической развертки, видеоусилителя, преобразователя и сигнального процессора; блока питания. Функции обработки и индикации информации выполняет ноутбук.

Съемка георадаром серии «ОКО» состоит из двух этапов и проводится следующим образом.

При предварительной диагностике съемка проводилась в непрерывном режиме, когда излучения импульсов происходит в соответствии с внутренней частотой георадара, при скорости перемещения до 5 км/ч. Если скорость больше, то возможно разрежение отраженных сигналов в грунтовой среде [2].

При детальной диагностике съемка проводилась в режиме перемещения (протягивания с позиционирующим колесом георадара), когда импульсы излучаются во время срабатывания позиционирующего устройства. Информация записывалась с точной привязкой к пикетажу [2].

Георадиолокационная диагностика земляного полотна кроме георадаров серии «ОКО» также проводилась специалистами ООО «Геологоразведка» с помощью георадиолокационного комплекса «Геоскоп», входящий в состав приборов, объединенных товарным знаком ТР-ГЕО [3].

Система мониторинга земляного полотна включает электромеханическую тележку, выполненную из диэлектрика, и узлы георадара «Геоскоп».

Работа георадаров серии ТР-ГЕО основана на излучении видеоимпульса с широким спектром регистрации отраженных от неоднородностей видеоимпульсов. Для приема и передачи сигналов используются отдельные антенны. Результаты обработки таких сигналов позволяют построить изображение отражающих границ различных неоднородностей среды зондирования, в том числе слоев балласта и земляного полотна. Программа обработки строит изображение в виде вертикального разреза грунта.

Область применения радаров ТР-ГЕО – среды с низким и умеренным затуханием радиоволн: скальные породы, влажные песчаные грунты и супеси, слабо увлажненные глины и суглинки. Георадары различаются диапазоном рабочих частот, размерами антенн, разрешающей способностью и глубиной зондирования.

Для проведения диагностики земляного полотна георадар ТР-ГЕО закрепляется на специальную тележку СМПЖД.

Тележка СМПЖД предназначена для крепления передающей и приемной антенн георадара в заданных положениях относительно рельсов и на заданной высоте. Кронштейны для крепления антенн, как и вся тележка, выполнены из диэлектрика. Это позволяет избежать нежелательных переотражений электромагнитных волн. Тележка управляется с помощью кабельного пульта. В дальнейшем она может быть оборудована дополнительно блоком радиуправления. Скорость перемещения тележки – 1,5 км/ч.

Измеренные при зондировании сигналы записываются во встроенную флэш-память георадара. По окончании зондирования данные могут быть занесены в

компьютер, и далее более детально обрабатываться. Возможна запись непосредственно в компьютер и просмотр результатов в реальном режиме времени. Записанные сигналы после обработки представляются в виде радарограммы [3].

При георадарных измерениях на пути возможны помехи (шумы) от рельсов и шпал, опор и подвесных проводов контактной сети, линий электропередачи, кабелей СЦБ, связи и др. Поэтому необходима адекватная антенная ориентация и по возможности использование экранированных антенных блоков.

С этой целью для более точных измерений применяется контактный способ измерений в пошаговом режиме регистрации (точечном), когда излучение импульсов происходит по команде оператора. При этом антенны вручную последовательно переставляют в шпальных ящиках, по оси междупутья или на плече балластной призмы.

Обрабатывая результаты георадиолокационных измерений, оценивают информационную устойчивость результатов (посредством детальной сверки радарограмм); обрабатывают радарограммы; маркируют их (наносит дату, условия съемки, параметры настройки аппаратуры); привязывают информацию радарограмм к продольному или поперечному профилю пути.

Полученные радарограммы требуют тщательной обработки и устранения помех (подавления шумов). Для этого их фильтруют, выбирают способ усиления результатов измерений, выполняют сглаживание, выбирают способ визуализации результатов измерений [2].

Результаты проведенных работ показали эффективность применения данной аппаратуры для исследования строения земляного полотна. Например, система мониторинга насыпи СМПЖД с антеннами размером 40×40 см и средней частотой спектра импульса 200 МГц показала высокую чувствительность к неоднородностям диэлектрических характеристик земляного полотна. Результаты зондирования выявили ряд отражений от границ раздела его слоев. Кроме того, на исследуемом участке, протяженностью 450-500 м обнаружен участок с просадкой грунта. При этом с целью уточнения достоверности полученных данных было проведено контрольное разведочное бурение. Результаты полностью подтвердились.

Для повышения производительности и достоверности полученных результатов в данный момент разрабатываются соответствующие методика и технические средства, позволяющие закрепить георадарный комплекс впереди транспортного средства. При скорости поезда 60 км/ч появится возможность записать сигнал в реальном режиме времени [3].

Для определения устойчивости откосов земляного полотна рельсового пути и обследования оснований зданий и сооружений, а также для инженерно-геологических изысканий в настоящее время широко применяют зонд РЗГ. По результатам применения этого зонда установлено, что независимо от значений коэффициента устойчивости K_y внутри откоса существует ослабленная зона (зона сдвигов), в которой минимальные сопротивления грунта зондированию в несколько раз меньше, чем в других местах. Изучали откосы насыпей, выемок и естественные склоны крутизной от 1:50 до 1:1,5, сложенные

песчаными и глинистыми грунтами [6].

Минимальное значение сопротивления грунта в зоне сдвигов соответствует положению поверхности скольжения откоса. При этом максимальная величина $K_y=12$. Наличие зоны сдвигов при таких значениях K_y можно объяснить реологическими свойствами грунта, вследствие которых происходит смещение откоса под собственным весом и весом сооружения. В зоне сдвигов из-за дилатенции (увеличение объема при сдвиге) уменьшается прочность грунта. По данным зондирования, она сначала убывает, а затем линейно возрастает от минимума до прочности массива. Это указывает на то, что грунт в зоне сдвигов ведет себя как структурно-вязкая жидкость, прочность ее уменьшается с ростом сдвигающего напряжения, которое достигает максимума в уровне поверхности скольжения, и увеличивается с удалением от этой зоны, так как сдвигающее напряжение уменьшается [1]. Обработка экспериментальных данных позволила установить зависимость коэффициента вязкости грунта η от сопротивления зондированию q :

$$\eta = \exp(a + bq), \quad (1)$$

где a и b – коэффициенты, определяемые опытным путем.

Зависимость сопротивлению сдвигу грунта τ в зоне сдвигов от времени t имеет вид:

$$\tau_i/\tau_0 = 1 - a_2 \ln(t_i/t_0),$$

где τ_i – сопротивление грунта сдвигу на начальный момент времени t_i ; τ_0 – сопротивление грунта сдвигу на начальный момент времени t_0 ; a_2 – коэффициент, определяемый опытным путем.

Принимая $\tau_i = \tau_{cd}$, где τ_{cd} – сдвигающее напряжение, можно предположить, что разрушение откоса со временем произойдет тем быстрее, при прочих равных условиях, чем ближе τ_{cd}/τ_0 к единице.

Используя формулу (1), можно также рассчитать скорость движения откоса со временем.

Обработка опытных данных позволила также получить формулу для скорости V движения откоса в зависимости от q :

$$V = a_3 q^{-n}, \quad (2)$$

где a_3 и n – коэффициенты, определяемые опытным путем.

Формула (2) может быть также представлена в безразмерном виде:

$$V_i/V_0 = a_3 (q_i/q_0)^{-n},$$

где V_0 и q_0 – соответственно скорость движения откоса и сопротивление грун-

та зондированию на начальный момент времени t_0 ; V_i и q_i – то же на момент времени t_i [6].

Анализ зависимости (2) показал (рис.2), что до некоторого значения $q_i < q_{пред}$ скорость движения откоса незначительна и составляет 1-2 см в год, и ее влиянием на эксплуатационные характеристики пути можно пренебречь. Однако при $q_i > q_{пред}$ эта скорость резко возрастает. При этом она может составлять более 10 см или даже десятки сантиметров в год, что небезопасно для движения. В связи с этим была разработана методика определения допустимых скоростей движения поездов с учетом результатов зондирования.

На Московской железной дороге был проведен эксперимент по укреплению песчаных шлейфов забивными стержнями и наблюдением за скоростью движения откоса с помощью зонда РЗГ. При исследовании песчаных шлейфов зондированием установлена и их чрезвычайно низкая плотность до глубины 0,8-1,0 м, а также обнаружена поверхность скольжения по контакту песчаного шлейфа и глинистого грунта насыпи откоса. Рыхлость шлейфа можно объяснить динамическим воздействием от поездной нагрузки. Поверхность скольжения песчаного шлейфа по глинистому грунту откоса образуется в результате смачивания и разрушения глинистого грунта во время дождей и талыми водами. Следует отметить, что вновь построенные песчаные насыпи теряют устойчивость из-за недостаточного уплотнения [6].

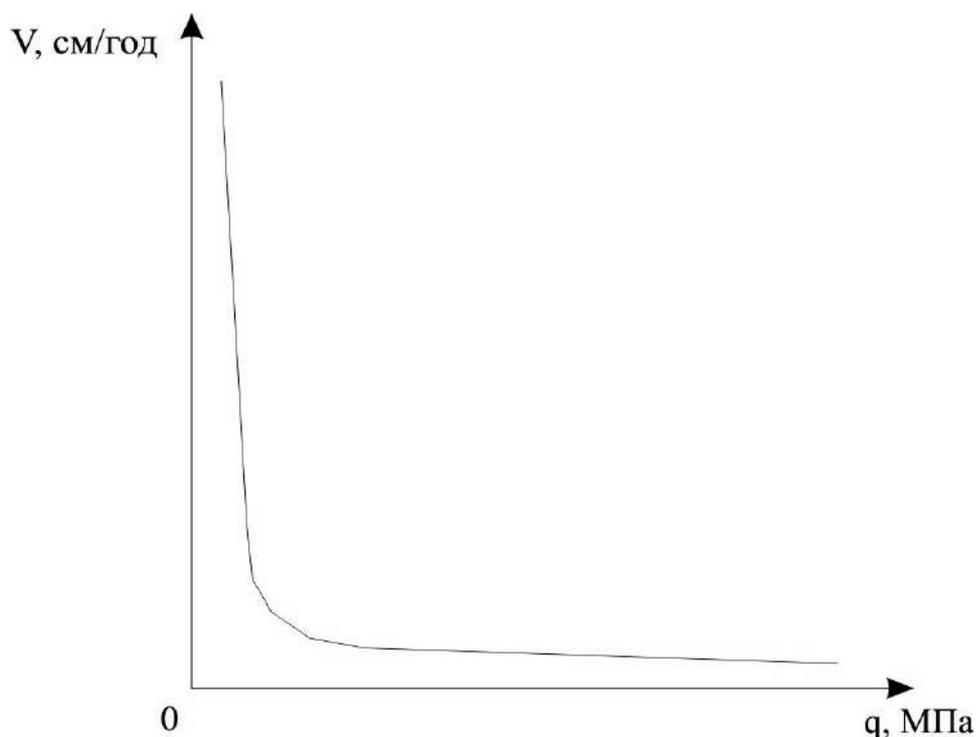


Рис. 2. – График зависимости скорости движения откоса V от сопротивления грунта зондированию q

Так как основные трудности при исследовании состояния неустойчивого земляного полотна возникают из-за сложности строения, резкой геоэлектри-

ческой неоднородности разреза по площади и глубине, небольшой мощности оползневого массива (обычно до 20 - 40 м), неровностей рельефа, высокой интенсивности электромагнитных помех, особенно на электрифицированных участках железных дорог. Решающее влияние на устойчивость оползня оказывают тонкие пласты слабых или пластичных пород, выявление которых требует особой тщательности исследований.

Для этих целей в научно-производственном предприятии «Интер» (г. Саратов) разработана новая технология, методика и аппаратно-программный комплекс, позволяющий зондировать разрезы в диапазоне глубин от 0,5 м до сотен метров. Точность выявления границ раздела слоев достигает 2 – 5 %, что сопоставимо с данными бурения [5].

Технологию геоэлектроразведки отработывали при изучении оползней на Приволжской железной дороге. Результаты зондирования сопоставляли с данными бурения.

На одном из участков была проведена съемка геоэлектрической структуры активного оползня. Тело оползня составляли делювиальные глины, суглинки и супеси, а также пески в водонасыщенном состоянии. Оно оползло по смоченной поверхности водоупора, представленного черными глинами. В результате оползневых процессов произошло два схода.

По результатам зондирования возможно определить слоистую структуру, выделить зоны обводненности, оценить степень насыщения слоев минерализованными водами и спрогнозировать устойчивость оползневого массива. Аппаратура позволяет выявить тонкие слои глин, линзы подземных вод и оценить степень их минерализации. После этого было произведено сопоставление полученных результатов с данными бурения ручным буром Д-127 на глубину до 6 м. Количество слоев, их мощность, месторасположение в буровых колонках и по результатам зондирования совпадают.

Согласно данным по скважинам, верхние слои имеют разные мощность и простираение, но общий уклон. Замечено резкое повышение минерализации грунтовых вод в местах с повышенной гидродинамикой [5].

Аппаратура и методика электроразведочных работ выявили уменьшение в 2-3 раза удельного электрического сопротивления слоев. В активной зоне оползня (менее 1-2 Ом·м) по сравнению с устойчивой зоной (2,7-5 Ом·м), а в точках зондирования, на берегу р. Волга (в 300 м от активной части оползня) удельное сопротивление слоев на глубинах 6-40 м, еще в 2-3 раза выше (5-10 Ом·м). Исходя из полученных результатов, в данном месте определяются две поверхности скольжения в соответствии с образовавшимися двумя стенами отрыва. В точке зондирования на глубине 9 м выделен слой скольжения, потенциально опасный для формирования и схода третьего блока оползня. В этом случае стена отрыва формируется под действующими железнодорожными путями, что приведет к значительному перерыву в движении поездов. В паводковый период (апрель) уровень водохранилища поднимается до отметки 20-22 м, а основание оползня находится на отметке 22,71 м, в то время как нижняя отметка поверхности скольжения находится на уровне 19 м. Следова-

тельно, грунтовые воды подпираются горизонтом вод водоохранилища, создавая эффект обратной фильтрации. При этом происходит интенсивное выщелачивание, а также уменьшение сдерживающей способности основания. При резком снижении уровня паводка грунтовые воды вытекают из массива, где происходит гидродинамический удар за счет резкого увеличения порового давления. Это сопровождается потерей прочности грунтов. Учитывая все отмеченные обстоятельства, была спрогнозирована после паводка, в начале мая, активизация оползня – подвижка двух существующих блоков. Этот прогноз подтвердился.

Второй оползень также наблюдался на Приволжской железной дороге на двухпутном электрифицированном переменным током участке (27 кВ). Обрушение насыпи высотой 9 м на два метра произошло после прохода скорого поезда [5].

Насыпь была восстановлена, выполнена прорезь и устроен контрбанкет. Для анализа и диагностики гидрогеологической ситуации в месте оползня пробурили скважину глубиной 15 м. Также было проведено геоэлектрическое зондирование вышеуказанной аппаратурой, и после его проведения, результаты также сопоставили с данными по шести пробуренным скважинам. Количество слоев, их мощность, месторасположение в буровых колонках и по результатам зондирования совпадают. Выявлен слой аргиллитоподобных глин мощностью 0,1-0,2 м на глубине 9 м в полутвердых зеленовато-серых глинах. Выделяется насыпной грунт, влажные и тугопластичные слои. Проведено сравнение естественной влажности 18-ти образцов керна из трех скважин с результатами геоинформационной геоэлектрической модели профиля оползня. Геоэлектрическая модель по профилю с точностью до сотых долей отображает распределение минерализованных вод в теле оползня [5].

Проведенные испытания показывают, что новая технология и аппаратно-программный комплекс импульсной индуктивной геоэлектроразведки позволяют:

1) определить удельную электропроводность и пластовое сопротивление, привести зависимости состояния и род грунтов к их электропроводности и удельному сопротивлению. Обеспечить разрешение по контрастности слоев и вмещающих пород, необходимое для выявления поверхности скольжения, активной части неустойчивого склона и потоков подземных вод;

2) отследить мощность (до десятков сантиметров) и простираание водоупоров, водоносных пластов, уровня грунтовых вод и водонасыщенность на момент изысканий;

3) установить возможные плоскости скольжения грунтовых масс;

4) отследить возможные области питания водоносного горизонта;

5) определить общий уклон напластований грунтов;

6) выявить границы раздела слоев с точностью 2-5 %, что сопоставимо с данными бурения;

7) представить модели геоэлектрического разреза объекта исследований на глубину от 0,5 до 250 м как в цифровом, так и полностью интерполирован-

ном видах.

Малые габариты и энергопотребление аппаратуры, технология работ при небольших размерах приемно-питающей петли, позволяют проводить исследования и геоэлектроразведку в движении, при автоматической обработке и интерпретации результатов измерений для вывода параметров и структуры геоэлектрического разреза на экран компьютера [5].

Однако независимо от способа диагностики для более качественного и своевременного выявления неисправностей земляного полотна и их последствий и недопущению серьезных последствий необходимо придерживаться следующих принципов:

1. Обеспечение комплексного подхода к оценке состояния земляного полотна, использование в полной мере мобильных средств контроля и диагностики.

2. Проведение систематизации архивных данных по земляному полотну.

3. Разработка эффективных методов прогнозирования и влияния развития деформаций, природных явлений на основе глубокого изучения геодинамических процессов в земляном полотне и прилегающей территории, в зависимости от различных эксплуатационных, инженерно-геологических, гидрологических, гидрогеологических и природно-климатических факторов.

4. Формирование нормативной базы по оценке состояния и содержания земляного полотна [7].

Лишь при соблюдении вышеуказанных принципов можно не только проводить качественную и своевременную диагностику земляного полотна, а и спроектировать основной комплекс работ по ликвидации этих неисправностей и, таким образом, избежать возможных неприятностей, связанных с нарушением пропускной способности данной железнодорожной линии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Говоруха В.В. Физико-технические основы создания элементов рельсового транспорта шахт и карьеров. – К.: Наукова думка, 1992.- 200 с.
2. Грицык В.И., Явна В.А., Ковдус В.В., Шаповалов В.Л., Окост М.В. О георадиолокационной диагностике // Путь и путевое хозяйство: М., 2004, - № 10 – С. 32-35.
3. Изюмов С.В., Дручинин С.В., Круглов Н.А., Коралев А.В., Поплавский В.Г. Обследование земляного полотна георадаром “Геоскоп” // Путь и путевое хозяйство: М., 2006, - № 6 – С. 36-38.
4. Лопакон С.А. Неисправности земляного полотна и способы их устранения // Геотехническая механика. – Днепропетровск, 2005. – Вып. 54. – С. 172 – 177.
5. Павлов А.Т., Лепешкин В.П., Павлов В.Т., Федукон М.Б., Павлова Ю.Н. Высокоразрешающий метод обследования земляного полотна // Путь и путевое хозяйство: М., 2005, - № 1 – С. 29-31.
6. Хамов А.П. Об опыте применения зонда РЗГ // Путь и путевое хозяйство: М., 2004, - № 10 – С. 35-36.
7. Яковлева Е.В. Прогнозировать деформации земляного полотна // Путь и путевое хозяйство: М., 2005, - № 6 – С. 29-32.