

А. Б. КАЗАРИН, Б. А. КАЗАРИН, Д. Е. ГУСЕВ, Г. П. ПАСТУШКОВ, В. Г. ПАСТУШКОВ, Д. В. ЖИХАРЕВ (БНТУ, Минск, Республика Беларусь)

## ПРАКТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОРАДАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ТОННЕЛЕЙ

В статті наведені практичні та аналітичні аспекти методології дослідження обробки тунелів за допомогою георадарних технологій.

В статье приведены практические и аналитические аспекты методологии исследования обделки тоннелей с помощью георадарных технологий.

In the paper the practical and analytical aspects of research methodology for a tunnel casings by georadar technologies are presented.

Перегонные тоннели метрополитена с обделкой из монолитно-прессованного бетона возводятся обжатием свежей бетонной смеси, уложенной за кольцевую опалубку. Такая технология снижает трудоемкость работ по сравнению с сооружением тоннеля со сборной обделкой, однако существенным недостатком монолитно-прессованной обделки является низкая трещиностойкость неармированного бетона, и могут возникнуть различного характера дефекты и повреждения. Наличие трещин в обделке, чаще всего, сопровождается фильтрацией через обделку воды. Наличие водных потоков может также привести к разуплотнению грунта в контактной с обделкой зоне.

Известно, что обследование обделки тоннелей носит комплексный характер. Кроме визуального осмотра, проводится определение прочностных свойств бетона, испытание выбуриваемых образцов, а также используются виброакустические, сейсмические и георадиолокационные методы [1]. Эффективность использования георадиолокационного метода в значительной степени определяется выбранной технологией исследования: методикой измерений, методикой построения радиолокационных изображений подповерхностной среды, методикой интерпретации радиолокационных изображений.

В данной статье приводятся результаты георадарных измерений на одном из участков Минского метрополитена. В процессе измерений была использована современная методика измерений, основанная на теореме Боярского [2], и методика построения радиолокационных изображений (РЛИ), основанная на синтезе апертуры антенны [3], которые отличаются от рекомендуемых в нормативных документах

[4, 5]. Обследованный участок Минского метро был сооружен в 1980 г. Обделка тоннеля выполнялась из бетона марки М300 с использованием проходческого щитового комплекса ТЩБ-7. Участок перегонного тоннеля был сдан в эксплуатацию в 1984 г. (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид участка перегонного тоннеля

Во время проведения обследования тоннеля на поверхности обделки в отдельных местах были обнаружены отслоения бетона. В процессе эксплуатации на исследуемом участке в обделке стали возникать трещины и открытые отслоения бетона (рис. 2).



Рис. 2. Вид участка дефектной поверхности

В 1993 г. при простукивании обделки были зафиксированы дефектные места, в которых создавался глухой звук. Площадь таких дефектных мест не превышала 0,3...0,5 кв. м.

Для выявления причин прогрессирующего развития дефектов обделки, выявления скрытых дефектов и выработки мероприятий по их устранению в 2006 г. авторами был выполнен комплекс работ, включающий:

- изучение проектной документации;
- визуальное освидетельствование состояния обделки;
- исследование состояния конструкции с помощью георадара по всей длине участка тоннеля (рис. 3);



Рис. 3. Исследование состояния конструкции с помощью георадара

- исследование прочности бетона обделки с помощью склерометра и методом отрыва со скалыванием;
- отбор образцов бетона путем выбуривания кернов с последующим испытанием образцов в лабораторных условиях (рис. 4).

Радиолокационные измерения выполнялись с использованием георадара «ЗОНД-10» на частоте 150 МГц, с варьированием поляризационных параметров зондирующего сигнала. Совместная обработка временных зависимостей амплитуд отраженных сигналов с различной поляризацией позволила построить радиолокационные изображения зондируемых подповерхностных сред по относительной плотности и относительной влажности.



Рис. 4. Отбор образцов бетона путем выбуривания кернов

В общем случае, РЛИ представляет собой цветную (черно-белую) двумерную матрицу размером  $m_1 \cdot L \cdot m_2 \cdot Z$  (где  $m_1$ ,  $m_2$  – масштабные коэффициенты,  $L$  – длина профиля,  $Z$  – глубина зондирования), размеры ячеек которой соответствуют размерам разрешаемых георадаром объемов подповерхностной среды, а их цвет (отенок) – амплитудам сигналов, отраженных от соответствующих разрешаемых объемов.

Связь цветовых градаций в представленных ниже РЛИ с нормированными амплитудами отраженных сигналов и оценочными значениями пористости, водонасыщения и модуля упругости приведены в таблице.

Георадарные измерения были выполнены в плоскости профиля 1 через лоток тоннеля, в плоскости профиля 2 через вершину тоннеля и плоскости профиля 3 с дневной поверхности проезжей части проспекта Независимости.

Анализ РЛИ подповерхностной среды в плоскости профиля 1 (лоток, обделка, грунт) по относительной плотности (рис. 5) показал, что коэффициент пористости бетонного основания пути и обделки тоннеля в пределах обследованного участка периодически меняется от значения «очень плотный» до значения «рыхлый». Протяженность плотных участков составляет около 0,4 м, а интервалов между ними – около 3,0 м. Наблюдается неровная наружная поверхность тоннеля под основанием пути на РЛИ. Можно предположить, что цементный раствор в процессе нагнетания проникал в полости грунта. Грунты, залегающие под обделкой тоннеля на глубину до 4,0 метров, можно охарактеризовать, как «плотные» с прослоями «рыхлых».

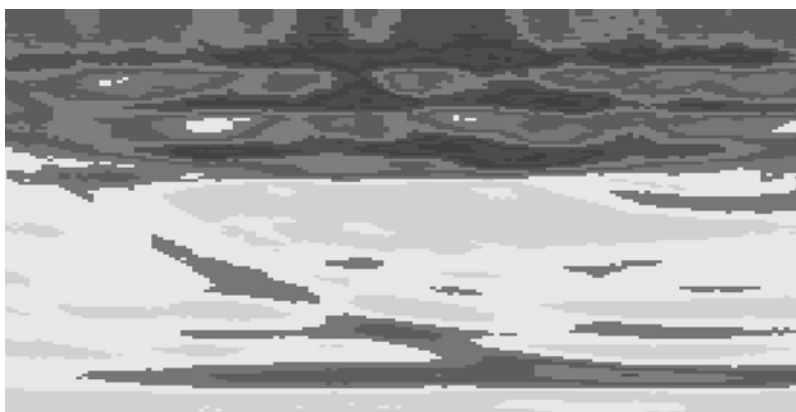


Рис. 5. РЛИ подповерхностной среды

Анализ РЛИ подповерхностной среды в плоскости профиля 1 по относительной влажности позволяет сделать вывод, что более разуплотненные участки бетонного основания пути являются и более влажными. На РЛИ отчетливо видны следы инфильтрации воды от поверхности лотка тоннеля до наружной поверхности обделки. В одном сечении тоннеля наблюдается инфильтрация воды в грунт, что свидетельствует о наличии в этом месте сквозной трещины.

Грунты, залегающие непосредственно под обделкой тоннеля можно охарактеризовать, как «влажные», «очень влажные», а в отдельных местах – «водонасыщенные».

Толща влажных грунтов под обделкой не превышает одного метра. Подстилающие эту толщу грунты наблюдаются маловлажными.

РЛИ подповерхностной среды, залегающей в плоскости профиля 2 (обделка, грунт, воздух), представлены на рис. 6. На РЛИ грунтов по относительной плотности отчетливо наблюдается толща обделки и граница дневной поверхности проезжей части с воздухом. Грунты, залегающие между дорожной одеждой и обделкой можно охарактеризовать как «рыхлые» с прослоями «средней плотности». Толща обделки наблюдается на РЛИ трехслойной. Наиболее плотными наблюдается крайний слой, контактирующий с грунтом и крайний внутренний слой. По данным анализа РЛИ полная толщина обделки не превышает 35 см, а толщина крайних слоев обделки составляет, соответственно, 10...12 и 5...6 см. Плотность промежуточного слоя обделки вдоль профиля меняется от значения «плотный» до значения «рыхлый». На РЛИ грунтов, залегающих в плоскости 2, по влажности, наибольшая концентрация поровой воды наблюдается непосредственно под дорожной одеждой проезжей части и вблизи обделки тоннеля. На РЛИ отчетливо видны не-

большие по мощности линзы водонасыщенного песка. Также видны следы инфильтрации атмосферной воды от дневной поверхности проезжей части проспекта к обделке, и далее, через сквозные трещины в обделке – к её внутренней поверхности (то, что наблюдалась в 1997 г. во время аварии теплосети). Сопоставление мест расположения дефектов обделки, визуально наблюдаемых на внутренней поверхности тоннеля, и обводненных трещин, наблюдаемых на РЛИ, показывает их совпадение с погрешностью около 25-30 см. Сопоставление мест расположения визуально наблюдаемых трещин в дорожной одежде проезжей части проспекта Независимости и мест инфильтрации воды, наблюдаемых на РЛИ, показывает их совпадение с погрешностью, в среднем, 0,5 м.

Для уточнения сделанных выше заключений относительно состояния обделки и картины сложения грунтов вблизи неё было выполнено зондирование тоннеля с дневной поверхности дорожного покрытия (профиль 3). Это оказалось возможным только благодаря отсутствию в обделке металлической арматуры. Плотность профиля 3 совпадала с продольным осевым сечением тоннеля. Подповерхностная среда представлена последовательно в виде элементов дорожной конструкции, грунтов, обделки в верхней части тоннеля, воздуха, обделки в нижней части тоннеля и грунта под тоннелем.

Анализ РЛИ подповерхностной среды, залегающей в плоскости профиля 3 по относительной плотности и влажности, показывает, что толща грунта над обделкой представлена тремя слоями глинистого грунта (мощностью 0,3...0,4 м) и перемежающимися с ними песков «рыхлых» и «средней плотности». Глубина залегания глинистых грунтов составляет 1,0, 2,5 и 4,0 м. В среднем слое глинистого грунта на отдельных участках наблюдаются разрывы сплошности. На РЛИ отчетливо видны верхняя

и нижняя границы обделки тоннеля, отстоящие друг от друга на расстоянии около 5.0 м. Гидрогеологическая обстановка над обделкой представлена подземными водами спорадического распространения в виде линз водонасы-

щенных песков. Их образование связано с инфильтрацией атмосферной воды с проезжей части проспекта через сквозные трещины в дорожном покрытии.

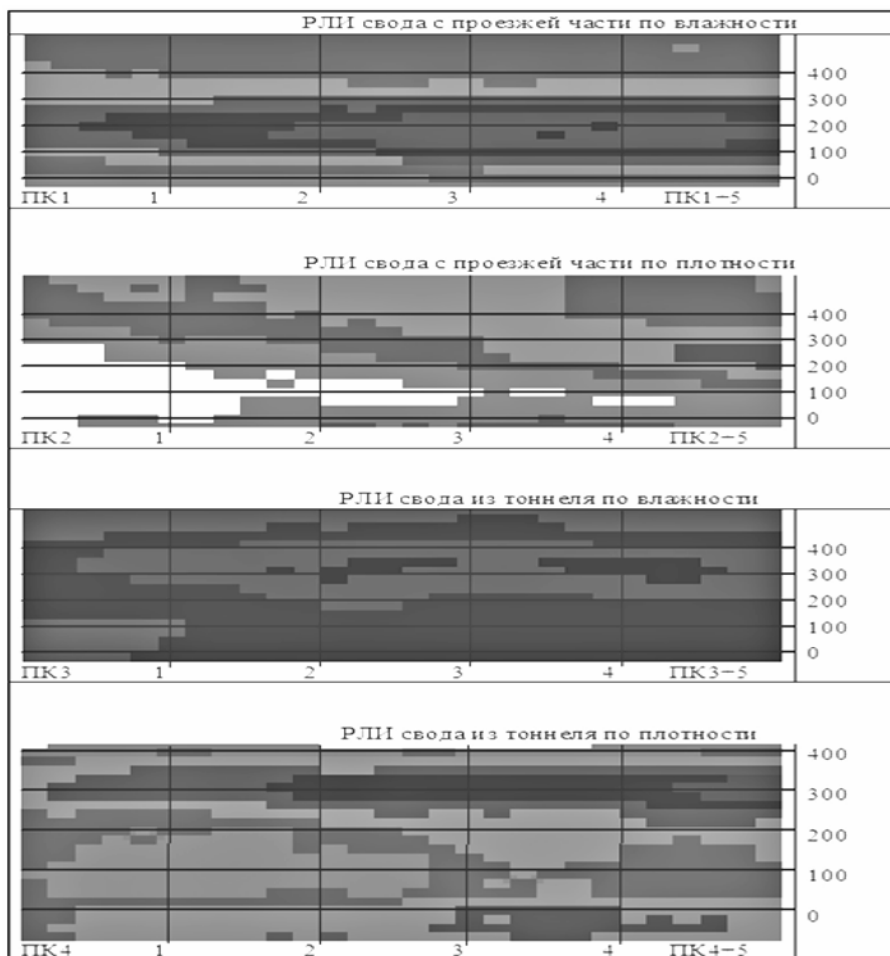


Рис. 6. РЛИ подповерхностной среды

Выводы: Использование георадарных технологий в комплексе с прямыми методами позволяют при обследовании обделок тоннелей (в которых отсутствует металлическая арматура) выявить все обводненные сквозные трещины в обделке и сделать оценку грунтов за её пределами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шилин А. А. Поведение обделки деривационного тоннеля № 1 Ирганайской ГЭС во время эксплуатации // Гидротехническое строительство, 2006, №4. – С. 20-25.

2. Левис, Обратная задача дифракции // Зарубежная радиоэлектроника, 1970, №2. – С. 100-113.  
 3. Реутов А. П. Радиолокационные станции бокового обзора / А. П. Реутов, Б. А. Михайлов, Г. С. Кондратенков, Б. В. Бойко. – М.: Сов. радио, 1970.  
 4. Технические указания по инструментальной диагностике земляного полотна, МПС РФ, М., 2000. – С. 20-25.  
 5. Методические рекомендации по применению георадаров при обследовании дорожных конструкций, МТ РФ, М., 2003 г.

Поступила в редколлегию 22.10.2007.