

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ЗАОБДЕЛОЧНОГО ПРОСТРАНСТВА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

С.В. Андрианов

ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: andrianovsemen@gmail.com

Аннотация: За последние десять лет выполнено множество работ с успешным использованием георадара для обнаружения дефектов заобделочного пространства горных выработок. Как правило, при выполнении измерений в тоннелях очень трудно получить данные высокого качества в связи с ограниченными условиями сбора данных, наличием большого количества воздушных помех, что может снизить качество интерпретации полученных результатов. Выделить глубинные отражения от фона с сильной шумовой составляющей иногда практически невозможно. Важнейшим инструментом в таких случаях является анализ атрибутов волнового поля: динамических и кинематических свойств полезного сигнала. В статье приведен пример георадиолокационной съемки различными типами антенных блоков с выполнением автоматического анализа атрибута добротности поля обратного рассеяния (ПОР). Сравниваются разрезы, полученные в рамках опытного мониторинга за состоянием заобделочного пространства после выполнения мероприятий по инъекционному закреплению разуплотненных зон за обделкой тоннеля метрополитена в г. Санкт-Петербурге. Результаты показывают, что атрибутный анализ повышает качество интерпретации георадиолокационных данных и является эффективным методом обнаружения дефектов контакта системы «обделка — грунт».

Ключевые слова: георадиолокация, георадар, атрибутный анализ, дифракция, поле обратного рассеяния, тоннель, железобетонная обделка.

Для цитирования: Андрианов С. В. Мониторинг состояния заобделочного пространства горных выработок методом георадиолокации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 5. – С. 124–132. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-124-132.

GPR monitoring of space between lining and rock in underground mines

S.V. Andrianov

OJSC «SRPSI «Lenmetrogioprotrans», Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: andrianovsemen@gmail.com

Abstract: In the past decade, ground penetrating radar (GPR) has many times been successful in detection of defects in the space between lining and rock mass in underground mines. As a rule, it is difficult to obtain high-quality data in tunnel measurements owing to limited conditions of information gathering and due to multiple unwanted air interference, which degrades interpretations. It is almost impossible to identify deep reflections from the background in case of heavy noise. The critical tool in such case is the analysis of wave field attributes: dynamic and kinematic properties of useful signal. This article gives an example of GPR sounding using different types of antenna assemblies with automatic analysis of the backscattered field quality. Under comparison are the cross-

sections obtained in the test monitoring of the lining/rock interface after injection reinforcement of weakened zone behind the tunnel lining in the Saint-Petersburg Metro. The results show that the attribute analysis improves quality of GPR data interpretation and is an efficient method of detecting defects at the lining–soil interface.

Key words: ground penetrating radar, attribute analysis, diffraction, backscattered field, tunnel, reinforced concrete lining.

For citation: Andrianov S. V. Мониторинг состояния заобделочного пространства горных выработок методом георадиолокации. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2019;5:124-132. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-124-132.

Введение

За последние десять лет наблюдается развитие транспортной инфраструктуры в России: проектируются и строятся транспортные и технические тоннели для различных нужд. Факторы, которые могут повлиять на качество конструкций и безопасность эксплуатации, включают в себя качество контакта в системе «обделка — грунт», скрытые пустоты и полости за обделкой тоннелей. Таким образом, обнаружение скрытых за обделкой тоннелей дефектов имеет решающее значение.

При строительстве и эксплуатации горных выработок необходимо контролировать состояние контакта «обделка — вмещающий горный массив», проводить мониторинг заобделочного пространства с целью предотвращения образования полостей и пустот, наличие которых влияет на несущую способность обделки горных выработок.

Для восстановления контакта «грунт-обделка» выполняют работы по заполнению пустот и разуплотнений грунтового массива, а также восстановлению тампонажного слоя, заполняющего строительный зазор, образующийся при проходке тоннелей между наружным контуром обделки и грунтовым массивом. Основой для разработки проектной документации на заполнение пустот, разуплотнений грунта и восстановление тампонажного слоя являются результаты геофизического обследования заобделочного пространства тоннелей и метро-

политенов [1]. Обнаруженные полости и пустоты на контакте сооружения и вмещающих грунтов в большинстве случаев ликвидируются применением инъекционного нагнетания цементного раствора за обделку тоннелей.

Инъекционное закрепление грунтов широко применяется при строительстве промышленных и гражданских зданий, в подземном и дорожном строительстве. Данная методика используется при усилении грунтового основания сооружений, защиты фундаментов от агрессивного воздействия, ликвидации водопритоков (течей) в горных выработках, удаления связанной воды в грунтах, увеличения коэффициента уплотнения грунта.

Качество инъекционного закрепления грунтового массива проверяется бурением скважин и проходкой шурфов с отбором монолитов для лабораторных испытаний, статическим и динамическим зондированием, геофизическими методами [2]. Ниже приводятся примеры опытных работ методом георадиолокации по контролю за качеством закрепления грунтов, оценке сплошности грунто-цементного массива. Рассматриваются возможности и перспективы методики с использованием нестандартных вариантов обработки георадиолокационных данных.

Методика работ

При строительстве тоннелей в неблагоприятных геологических условиях, после окончания проходки горных вы-

работок, зачастую наблюдаются течи на поверхности железобетонных обделок, свидетельствующие о проникновении воды из вмещающих горных пород.

В данной работе показан опыт применения георадиолокации при контроле за процессом закрепления цементным раствором заобделочного пространства на участке строящегося перегонного тоннеля Петербургского метрополитена со сборной железобетонной обделкой, пройденного в глинах с прослоями водонасыщенных песчаников.

Образовавшиеся после проходки тоннеля течи были зафиксированы на поверхности тубингов трех железобетонных колец (ширина кольца 1 м, толщина 0,15 м), последующее нагнетание производилось за обделку тоннеля по всему контуру выработки равноудаленно по 4 м (4 кольца) в одну и в другую сторону от центрального кольца «проблемного» места.

Всего было выполнено три этапа георадиолокационных измерений. Первый

этап был выполнен до выполнения мероприятий по нагнетанию цементного раствора, второй этап был выполнен спустя два месяца после окончания работ по инъектированию цементного раствора: данный временной интервал является достаточным для достижения максимальной твердости раствора. Третий этап был выполнен спустя один год после выполнения второго этапа.

Георадарные работы проводились с помощью прибора ОКО-3 (радиотехнический прибор поверхностного зондирования) производства ГК «Логис — Геотех». При проведении исследований на объекте, использовалась схема георадиолокационного комплекса с использованием антенных блоков конструкции АБ-700 с центральной частотой 700 МГц и АБ-1200 с центральной частотой 1200 МГц.

В связи с большим количеством коммуникаций, проложенных вдоль тоннеля и невозможностью выполнения измерений в сводовой части, георадиолокационное зондирование производилось в



Рис. 1. Схема выполнения опытных георадиолокационных работ

Fig. 1. GPR testing setup

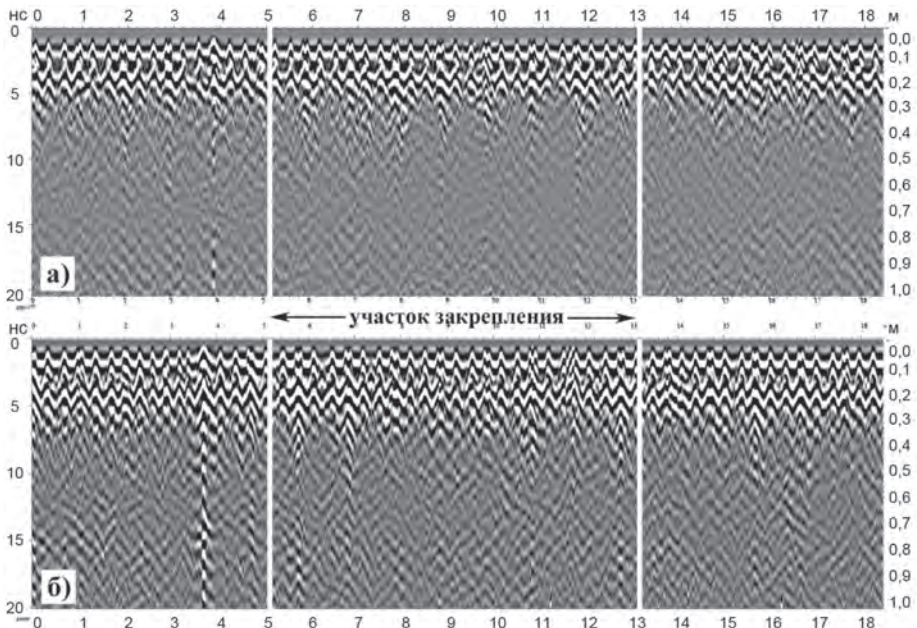


Рис. 2. Георадиолокационное изображение разреза, выполненное по результатам сканирования антенным блоком 1200 МГц: до выполнения закрепления (1 этап) (а); после инъектирования (2 этап) (б)

Fig. 2. GPR sounding image of cross-section by scanning results of 1200 MHz antenna assembly: (a) before reinforcement (stage 1); (b) after injection (stage 2)

доступном для выполнения работ участке, в районе нижнего полусвода тоннеля (рис. 1).

Результаты

Сбор георадиолокационных данных в горных выработках и, в частности, в тоннелях метрополитена более ограничен, чем проводимый на дневной поверхности: данные обычно содержат много случайных шумов и регулярных помех. На практике обычно используются георадары с центральной частотой антенных блоков от 1 ГГц для получения данных с более высоким разрешением. Арматура в железобетонной обделке вызывает сильное рассеяние на высоких частотах и сильно мешает сигналам, отраженным от более глубоких целей, что затрудняет интерпретацию данных [3].

На рис. 2 показаны результаты георадиолокационной съемки, выполненные

антенным блоком с частотой 1200 МГц. На рис. 2, а представлено георадиолокационное изображение разреза первого этапа измерений (до выполнения работ по инъектированию цементного раствора за обделку), на рис. 2, б — второй этап измерений (спустя 2 месяца после укрепительных мероприятий). На представленных ниже радарограммах левая вертикальная ось — время в наносекундах, правая вертикальная ось — глубина в метрах ($\epsilon \approx 9$), горизонтальная ось — длина профиля в метрах. Обработка представлена: вычитанием среднего в скользящем горизонтальном окне, горизонтальной и вертикальной частотной фильтрацией, коррекцией амплитуд [4].

На рис. 2 в обоих случаях четко отображается два ряда арматурного каркаса, граница контакта между тубингами обделки и вмещающими горными породами не прослеживается в виду наложе-

ния гиперболических осей синфазности от второго ряда арматуры. Проанализировать условия на контакте, локализовать полости и характер распространения проинъектированного цементного раствора на границе обделки с грунтом не представляется возможным. Анализ огибающей сигналов после преобразования Гильберта также не дал успешных результатов.

Глубинность георадиолокационного обследования определяется особенностями конструкции (ее многослойностью, свойствами материала, свойствами промежуточных слоев, характером армирования). Для решения поставленных задач и увеличения глубины обследования нужны георадары более низких частот. Вмещающий массив за обделкой тоннелей для обследования антенным блоком с частотой 1200 МГц и выше по большей части не доступен [5–8].

На рис. 3 приведены результаты обследования этого же участка антенным блоком АБ-700 с центральной частотой зондируемых импульсов 700 МГц. На рис. 3, а представлено георадиолокационное изображение разреза первого этапа измерений (до выполнения работ по инъектированию цементного раствора за обделку), на рис. 3, б — второй этап измерений (спустя 2 месяца после укрепительных мероприятий), на рис. 3, в — третий этап измерений, выполненный спустя год после выполнения второго этапа.

В связи с высоким уровнем амплитуд входного сигнала на рис. 3 была выполнена автоматическая регулировка уровня амплитуд для анализа структуры «слабых» сигналов за обделкой.

Основным идентифицируемым признаком наличия полости за обделкой является так называемый «звон» — квазигармонический сигнал высокой амплитуды. Поскольку данный эффект наблюдается при наличии полостей за обделкой, заполненных как водой, так и

воздухом, то, возможно, «звон» отраженного сигнала формируется как множество переотражения в полости [9].

На рис. 3, а в интервале между пикетами профиля ПК 6 — ПК 9 (отмечено красным пунктиром) выделяется признак наличия за обделкой полости — характерного «звона». О наличии полости в этом месте также свидетельствует присутствие на волновой картине кратного отражения на рисунке во временном интервале между 15–20 нс (отмечено красными стрелками). Наличие подобной аномальной области в рамках участка, где производилось инъектирование, не наблюдается, что говорит о качественном закреплении полости в грунтовом массиве. С другой стороны, на рис. 3, б и 3, в подобные аномальные зоны появились за пределами области закрепления, например, в интервале между пикетами профиля ПК 11 — ПК 13.

Для определения качества закрепления массива и характера распространения цементного раствора за обделкой был применен атрибутивный анализ. Аtribuтивный анализ — инструмент обработки для выделения дополнительной информации из геофизических данных (таких как, например, относительное затухание, амплитуда отражения или информация о частотном составе), стал популярным в последние десятилетия в связи с развитием компьютерных технологий и широко применяется в «нефтяной» сейсморазведке [10, 11].

Для решения поставленной задачи был выполнен автоматический анализ поля обратного рассеяния (ПОР) в программном продукте «Георадар-эксперт». Поле обратного рассеяния представляет собой массив дифрагированных сигналов, образующихся в ходе отражения от локальных неоднородностей, линейные размеры которых в плоскости георадиолокационного профиля сопоставимы с длиной волны излученных импульсов. В ходе автоматизированного анализа

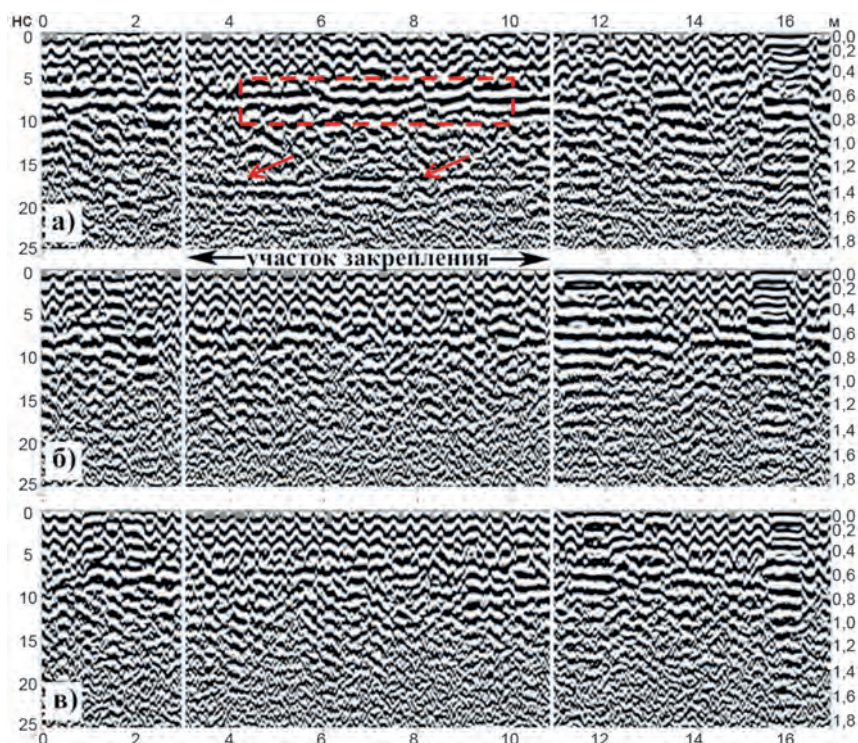


Рис. 3. Георадиолокационное изображение разреза, выполненное по результатам сканирования антенным блоком 700 МГц: до выполнения закрепления (1 этап) (а); после инъектирования (2 этап) (б); спустя год после 2 этапа (3 этап) (в)

Fig. 3. GPR sounding image of cross-section by scanning results of 700 MHz antenna assembly: (a) before reinforcement (stage 1); (b) after injection (stage 2); (c) a year after stage 2 (stage 3)

измерялись кинематические и динамические характеристики сигналов, формирующих поля обратного рассеяния, в результате чего имелся набор точек с координатами положения в пространстве георадиолокационного профиля [12, 13]. Каждая точка обладала набором атрибутов волнового поля, интерполяцией данных между которыми и формировался разрез требуемого атрибута. В результате обработки наиболее информативными оказались разрезы добротности поля обратного рассеяния или так называемого Q-фактора [14]. Разрезы автоматически рассчитывались по соотношению:

$$Q = \omega / \Delta\omega,$$

где ω — центральная частота отраженного импульса георадара; $\Delta\omega$ — ширина

спектра отраженного импульса на уровне -3 дБ.

Георадиолокационные исследования по контролю качества закрепления грунтов показали, что повышение значений добротности поля обратного рассеяния свидетельствует о пониженной плотности подстилающего грунта [15–18]. Таким образом, использование данного инструмента позволяет получить информацию о местоположении деструктивных зон и нарушенных участков и проследить динамику процессов по закреплению грунтов в рамках мониторинга. На рис. 4 представлены полученные результаты обработки данных, представленных на рис. 3.

На рис. 4, а на изображении разреза по профилю, выполненному до мероприятий по нагнетанию цементного

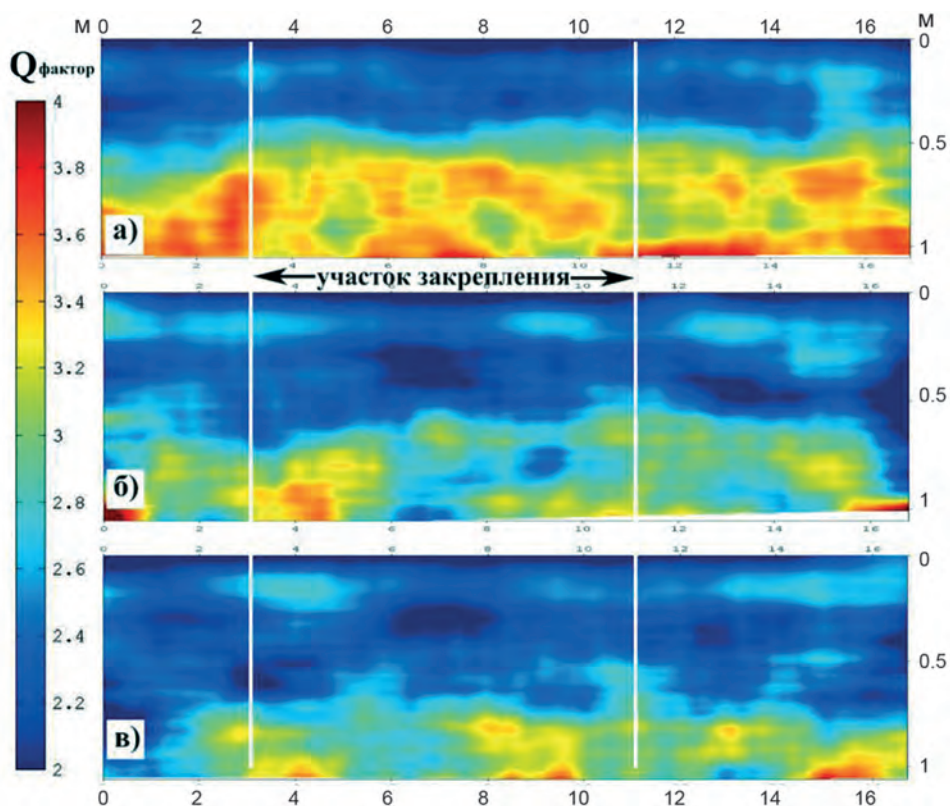


Рис. 4. Разрезы по атрибуту добротности ПОР, выполненное по результатам сканирования антенным блоком 700 МГц: до выполнения закрепления (1 этап) (а); после инъектирования (2 этап) (б); спустя год после 2 этапа (3 этап) (в)

Fig. 4. Cross-sections with respect to backscattered field quality by scanning results of 700 MHz antenna assembly

раствора, преимущественно на участке с проявлениями течей на поверхности обделки, преобладают максимальные значения атрибута добротности ПОР, что свидетельствует о наличии зоны разуплотнения в заобделочном пространстве. После нагнетания раствора на втором и третьем этапе мониторинга преобладают минимальные значения атрибута, что соответствует относительно повышенной плотности по сравнению с другими участками на разрезе; прослеживается контур закрепления грунтов.

Выводы

Результаты опытных измерений показывают, что применение георадиоло-

кации по предлагаемой методике дает возможность:

- разработать критерии для оценки качества закрепления грунтов, контролировать сплошность закрепления на строительных объектах, в том числе за обделкой тоннелей в режиме долгосрочного мониторинга;
- оценивать контур закрепленного массива, его пространственное распределение, местоположение ослабленных зон;
- установить корреляцию между физико-механическими свойствами грунтов и добротностью поля обратного рассеивания для различных типов горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 57208-2016 Тоннели и метрополитены. Правила обследования и устранения дефектов и повреждений при эксплуатации.
2. СП 45.13330.2017 (СНиП 3.02.01-87): Земляные сооружения, основания и фундаменты.
3. *Feng K., Zhao Y., Wu J., Ge S.* Cross-correlation attribute analysis of GPR data for tunnel engineering / 15th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), IEEE. 2014. pp. 435–440.
4. *Владов М. Л., Старовойтов А. В.* Введение в георадиолокацию. Учебное пособие. — М.: Изд-во Московского Университета, 2004. — С. 52–60.
5. *Xiongyao X., Li Z., Biao Z.* Real-time detection technology of synchronus grouting for shield tunnel and analysis of grouting effect / 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), IEEE. 2018. pp. 405–410.
6. *Poomvises, Nppadol, Anchalee Kongsuk, Prateep Pakdeerod, Tanapon Suklim.* Application of Ground Penetrating Radar and Hilbert transformation helps revealing anomalous body of leakage in a concrete structure. A case history at Huai Mae Tor, Tak province, Thailand / 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), IEEE. 2018. pp. 427–430.
7. *Набатов В. В., Гайсин Р. М., Николенко П. В.* Локация течей с помощью георадаров при строительстве и эксплуатации подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 7. — С. 161–167.
8. *Parkinson G., Ekes C.* Ground penetrating radar evaluation of concrete tunnels linings / 12th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), IEEE. 2008. p. 11.
9. *Набатов В. В., Гайсин Р. М.* Обработка данных георадиолокационной съемки при выявлении полостей в заобделочном пространстве // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 1. — С. 19–25.
10. *Владов М. Л., Судакова М. С.* Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. Учебное пособие — М., Изд-во «ГЕОС», 2017. — С. 186.
11. *Subrahmanyam D., Rao P. H.* Seismic attributes— A review / 7th International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, Hyderabad 2008, pp. 398–404.
12. *Денисов Р. Р., Капустин В. В.* Обработка данных в автоматическом режиме // Геофизика. — 2010. — № 4. — С. 76–80.
13. *Deming R., Devaney A. J.* A filtered backpropagation algorithm for GPR // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. 1996 Jan 1;1(B):113–123.
14. *Pudova N., Shirobokov M., Kuvaldin A.* Application of the Attribute Analysis for Interpretation of GPR Survey Data // 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), IEEE. 2018. pp. 590–593.
15. *Гапонов Д. А., Фоменко Л. Н. и др.* Применение георадара для контроля качества закрепления грунтов // Инженерный вестник Дона. — 2016. — № 3. — С. 68.
16. *Андрианов С. В.* Контроль за закреплением заобделочного пространства методом георадиолокации на примере тоннелей метрополитена / Труды Международной геолого-геофизической конференции «Геоевразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии». — М.: Изд-во «ПолиПРЕСС», 2018. — С. 623–626.
17. *Фоменко Н. Е., Гапонов Д. А., Капустин В. В. и др.* Возможности георадарного метода при обследовании подпорных стен и ограждающих конструкций // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2017. — Т. 328. — № 3. — С. 37–45.
18. *Андрианов С. В.* Опыт применения георадиолокации при оценке качества инъекционного закрепления грунтового массива / Материалы докладов XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» — М., 2018. — С. 365–368. **ПЛАБ**

REFERENCES

1. *Tonnelli i metropoliteny. Pravila obsledovaniya i ustraneniya defektov i povrezhdeniy pri ekspluatatsii GOST R 57208-2016* [Tunnels and subways. Regulations for inspection and elimination of defects and damages during operation. State Standart R 57208-2016].

2. Zemlyanye sooruzheniya, osnovaniya i fundamenti SP 45.13330.2017 (SNiP 3.02.01-87) [Earth structures, basements and foundations СП 45.13330.2017 (Construction norms and regulations SNiP 3.02.01-87)].

3. Feng K., Zhao Y., Wu J., Ge S. Cross-correlation attribute analysis of GPR data for tunnel engineering. *15th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, IEEE. 2014. pp. 435–440.

4. Vladov M. L., Starovoytov A. V. *Vvedenie v georadiolokatsiyu*. Uchebnoe posobie [Introduction to ground penetrating radar. Educational aid], Moscow, Izd-vo Moskovskogo Universiteta, 2004, pp. 52–60.

5. Xiongyao X., Li Z., Biao Z. Real-time detection technology of synchronus grouting for shield tunnel and analysis of grouting effect. *17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, IEEE. 2018. pp. 405–410.

6. Poomvises, Nppadol, Anchalee Kongsuk, Prateep Pakdeerod, Tanapon Suklim. Application of Ground Penetrating Radar and Hilbert transformation helps revealing anomalous body of leakage in a concrete structure. A case history at Huai Mae Tor, Tak province, Thailand. *17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, IEEE. 2018. pp. 427–430.

7. Nabatov V. V., Gaysin R. M., Nikolenko P. V. Leakage flow location by GPR in underground construction and operation. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017, no 7, pp. 161–167. [In Russ].

8. Parkinson G., Ekes C. Ground penetrating radar evaluation of concrete tunnels linings. *12th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, IEEE. 2008. p. 11.

9. Nabatov V. V., Gaysin R. M. Ground penetrating radar survey data processing in void detection in the space between lining and rock. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018, no 1, pp. 19–25. [In Russ].

10. Vladov M. L., Sudakova M. S. *Georadiolokatsiya. Ot fizicheskikh osnov do perspektivnykh napravleniy*. Uchebnoe posobie [GPR. Ground penetrating radar. From basic physics to future trends. Educational aid], Moscow, Izd-vo «GEOS», 2017. C. 186.

11. Subrahmanyam D., Rao P. H. Seismic attributes— A review. *7th International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics*, Hyderabad 2008, pp. 398–404.

12. Denisov R. R., Kapustin V. V. Automatic-mode data processing. *Geofizika*. 2010, no 4, pp. 76–80. [In Russ].

13. Deming R., Devaney A. J. A filtered backpropagation algorithm for GPR. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. 1996 Jan 1;1(B):113–123.

14. Pudova N., Shirobokov M., Kuvaldin A. Application of the Attribute Analysis for Interpretation of GPR Survey Data. *17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, IEEE. 2018. pp. 590–593.

15. Gaponov D. A., Fomenko L. N. Application of GPR to control quality of soil reinforcement. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2016, no 3, pp. 68. [In Russ].

16. Andrianov S. V. Lining/rock interface reinforcement control by GPR in terms of subway tunnels. *Trudy Mezhdunarodnoy geologo-geofizicheskoy konferentsii «Geoevraziya 2018. Sovremennyye metody izucheniya i osvoeniya nedr Evrazii»*. Moscow, Izd-vo «PoliPRESS», 2018, pp. 623–626. [In Russ].

17. Fomenko N. E., Gaponov D. A., Kapustin V. V. Ground penetrating radar method capacities in diagnostic study of retention walls and enclosing structures. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2017. Vol. 328, no 3, pp. 37–45. [In Russ].

18. Andrianov S. V. Case study: GPR in quality evaluation of soil injection reinforcement. *Materialy dokladov XIV Obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i vystavki «Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitel'stve v Rossiyskoy Federatsii»*. Moscow, 2018, pp. 365–368. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Андрианов Семен Валерьевич — младший научный сотрудник,
ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», e-mail: andrianovsemen@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

S.V. Andrianov, Junior Researcher, e-mail: andrianovsemen@gmail.com,
OJSC «SRPSI «Lenmetrogioprotrans», 191002, Saint-Petersburg, Russia.