

В.В. Набатов, Р.М. Гайсин

ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АРМИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНОВ. СПЕКТР ЗАДАЧ И ПОМЕХОВЫХ ФАКТОРОВ

Рассмотрены вопросы георадиолокационного контроля параметров армирования. Приведены примеры нестандартных ситуаций. Описаны задачи контроля: выявление шага армирования, выделение второго ряда армирования, определение толщины защитного слоя. Описаны помеховые факторы, осложняющие выполнение этих задач.

Ключевые слова: прикладная геофизика, неразрушающий контроль, георадар, георадиолокация, железобетонная обделка, армирование, шаг армирования, второй ряд армирования, толщина защитного слоя, помеховые факторы.

Введение. При обследовании тоннелей метрополитенов необходимость получения информации о параметрах армирования связана не только с оценкой несущей способности конструкции. Достаточно часто знания о характере армирования важны для внесения его в модели, по которым методом конечных элементов рассчитываются напряжения в геомассиве и его деформации под воздействием стоящих вблизи от тоннеля сооружений. Такие расчеты выполняются как при строительстве наземных зданий, так и подземных сооружений (новые тоннели метро, коллектора, подземные коммуникации). Решаются вопросы «как будет влиять тоннель на сооружение» и «как будет влиять сооружение на тоннель». В этой статье обобщены задачи, которые возникают в процессе георадиолокационного выявления параметров армирования тоннелей и конструкций, даны примеры обследований, обобщены помеховые факторы и намечены возможные пути решения проблем.

Методы. Весь материал в этой статье получен на георадаре «ОКО-2» 1200 и 1700 МГц на элементах конструкций и обделках Московского

метрополитена. На представленных радарограммах левая вертикальная ось – время в наносекундах, правая вертикальная ось – глубина в метрах, горизонтальная ось – длина вдоль по профилю в метрах, либо сантиметрах (единицы подписаны в правом верхнем углу). Типичные шаги между трассами 10–25 мм. Типичные накопления 4–128 (в редких случаях до 256) записи на точку профиля. В обработке преобладают: гиперболическая миграция (ГМ), или как ее еще называют фокусировка [1, с. 78]; амплитудное преобразование Гильберта (АПГ); деконволюция; автоматическая регулировка уровня амплитуд; вычитание среднего в скользящем горизонтальном окне (ВС); медианная фильтрация.

Результаты и их обобщение.

Параметры армирования в конструкциях подземных сооружений могут достаточно сильно варьировать. Подобные участки обычно достаточно локальны, однако в случае если такой участок попадает в зону воздействия строящегося здания, то желательно что бы он был выявлен.

На рис. 1 представлены примеры подобных ситуаций. На рис. 1, а-г обработка – ГМ-АПГ; на рис. 1, д

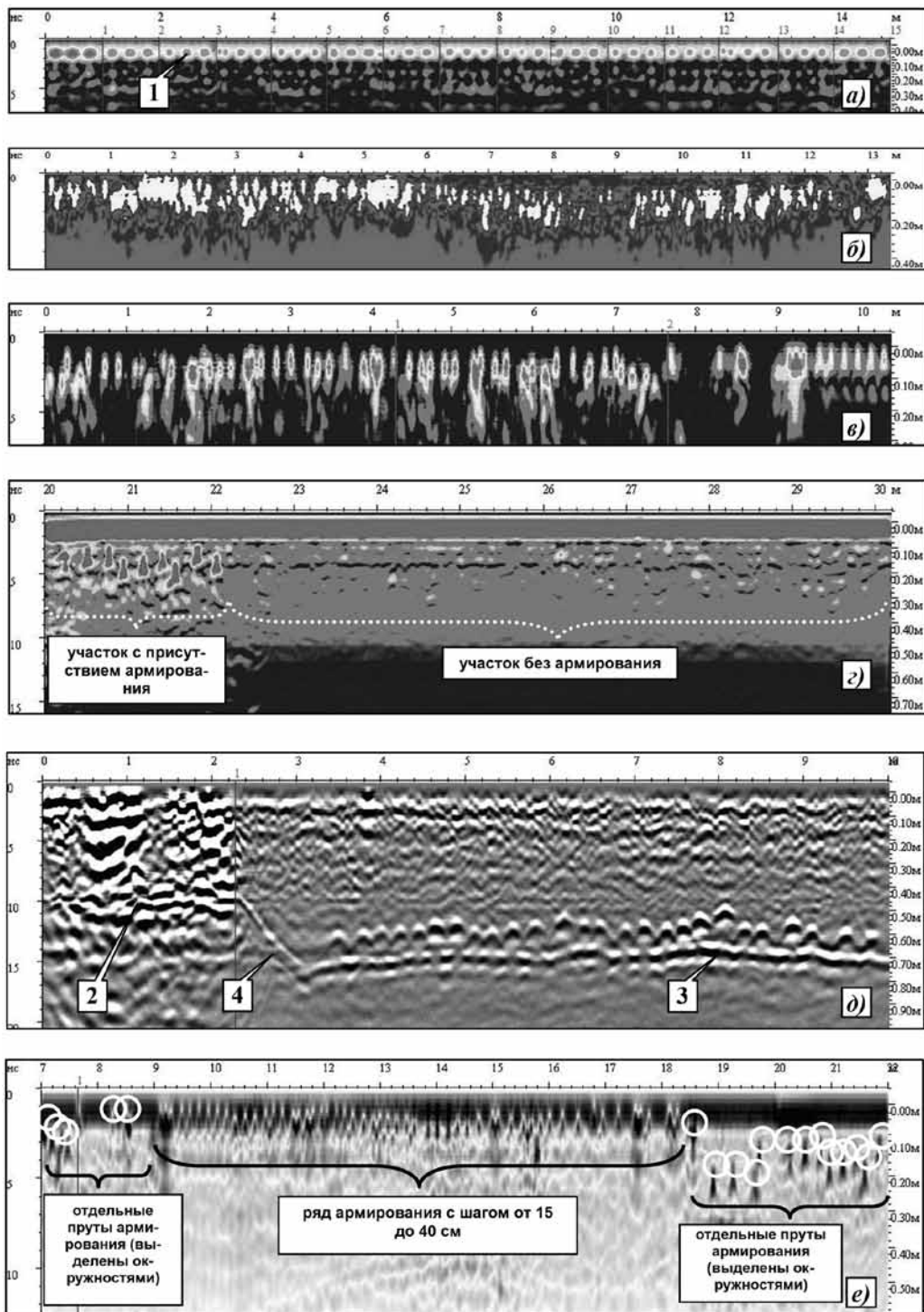


Рис. 1. Примеры результатов, полученных при контроле армирования

обработка – только ГМ, на рис. 1, е обработка – только АПГ. Рис. 1, а – пример строго регулярного армирования с равномерным, выдержанным шагом (цифра 1 – аномалия от одного прута). Рис. 1, б – пример изменения толщины защитного слоя (на участке 6–11 м). Рис. 1, в – изменение шага армирования. Рис. 1, г – выявлен участок полностью лишенный армирования (однако толщина обделки здесь – 70 см, граница «обделка-грунт» в этом примере подавлена обработкой, которая была направлена на выделение армирования, а не границ). Рис. 1, д – сложная ситуация, в которой обделка толщиной 40 см (ось синфазности указана цифрой 2) в переходит в обделку толщиной 70 см (ось указана цифрой 3). Также видна ось, образованная дифрагированной волной (цифра 4). Выше границы цифра 3 находится арматурная сетка, которая отсутствует выше. Не смотря на то, что разрез смигрирован, гиперболические оси синфазности (ГОС) не удалось подавить (диэлектрическая проницаемость ϵ' , подобрана по оси цифра 4). Арматурные пруты здесь имеют большой диаметр, не удивительно, что ряд хорошо просматривается на большой глубине. Рис. 1, д – пример сложного участка, где наблюдается изменение шага, его регулярности и глубины заложения армирования.

На первый взгляд проблема оценки параметров армирования одна из самых простых, что связано с существенно различными свойствами бетона и металла, в первую очередь с существенно разной проводимостью. Однако существует ряд задач, которые решаются с некоторыми трудностями из-за различных помеховых факторов.

1. *Выявление шага армирования.* Обычно на радарограммах первый ряд армирования достаточно хорошо выражен либо в виде ГОС, либо

в виде амплитудных максимумов (особенно после ГМ-АПГ). При достаточно малом шаге съемки на радарограммах обычно можно выделить каждый арматурный прут первого ряда. Помеховым фактором при решении этой задачи может становиться само армирование. При слишком плотном шаге оно начинает работать как непреодолимый для излучения экран – сигналы оказываются зашумлены так называемым «звоном» [2]. Поэтому обследование возможно только с помощью высокочастотных георадаров [3]. Примеры в этой статье получены на георадаре «ОКО-2» 1200 и 1700 МГц. Ограниченно удавалось решать подобные задачи на фундаментных плитах с использованием антенн 700 МГц при сетках 20x20. Существует рекомендация при оценке возможности обследования армированной конструкции опираться на принцип «длина волны должна быть меньше чем шаг армирования». При действительной части диэлектрической проницаемости конструкции $\epsilon' = 6-9$ и средней частоты георадарного импульса $f = 700$ МГц длина волны $\lambda = 17,5-14$ см, что меньше сетки 20x20.

В ряде случаев помеховым фактором может становиться сама строительная конструкция, когда армирование перекрыто толстым слоем неармированного бетона (иногда такое перекрытие многослойно и радарограмма содержит отражения от границ этих слоев). Сигнал затухает при двойном пробеге в бетонной подушке и интерферирует с помехами. Из-за затухания «усы» ГОС оказываются короткими, а отраженный сигнал характеризуется малой амплитудой. Это иллюстрирует рис. 2, а (армирование указано цифрой 1). Еще одним примером может послужить рис. 1, д. Однако здесь на большой глубине находится армирование большей толщины

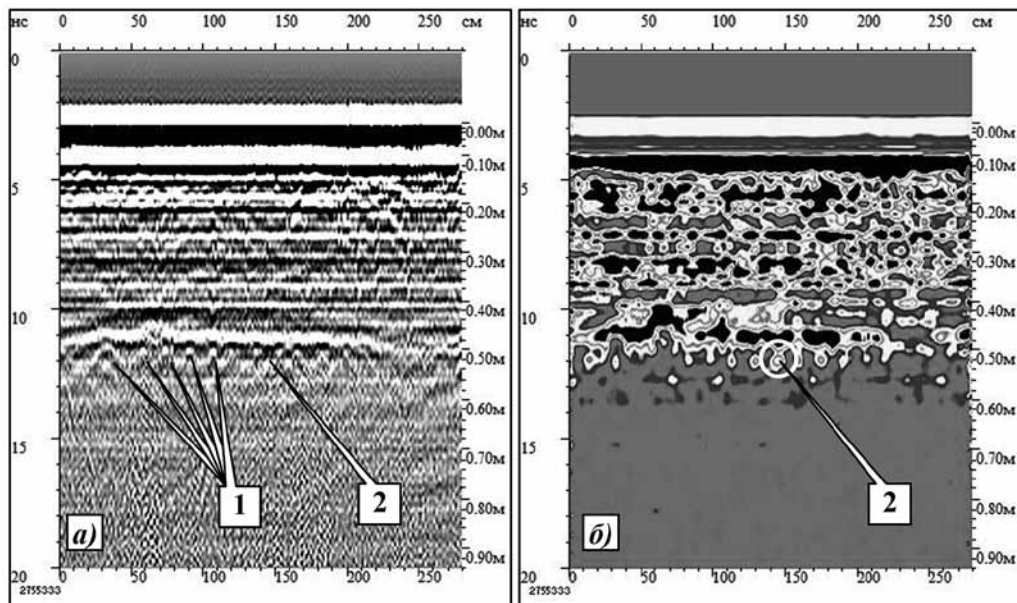


Рис. 2. Помеховые факторы при выделении армирования

прута и «усы» здесь более выражены (они обладают так же большой длительностью, что не видно из-за обработки выбранной для рис. 1, д).

2. Выделение второго ряда армирования, определение толщины обделки. Принятие решения о наличии второго ряда важно, поскольку это влияет на прочностные свойства конструкции и ее поведение при изменении нагрузок. Основным признаком выделения и 1-го и 2-го ряда является регулярность аномалий (см. рис. 3, б).

Основным помеховым фактором при выделении 2-го ряда является влияние 1-го: «усы» ГОС от соседних прутков 1-го ряда накладываются друг на друга, формируя сложную сеть помеховых артефактов. В результате при обследовании обделок, из-за интерференции помех достаточно часто бывает трудно выделить прут армирования, не смотря на то, что он создает достаточно существенный амплитудный максимум. В ряде случаев не удается выделить 2-й ряд даже по мигрированному разрезу – приходится

снимать несколько радарограмм, рассчитывая на то, что в какой то из этих съемок свойства бетона или помеховая ситуация, или смешение первого ряда относительно второго позволят выявить регулярный ряд аномалий.

При этом пересечение «усов» ГОС может создавать ложный ряд аномалий ниже первого ряда. «Усы» будут продолжаться дальше точки пересечения, а их наклон будет соответствовать ϵ' среды, что при мигрировании создаст максимум. В результате точки пересечения будут выглядеть как второй ряд армирования. Пример подобной ситуации представлен на рис. 2, б (это иначе обработанная радарограмма рис. 2, а) на котором обработкой выделен регулярный ряд локальных максимумов (один из них обведен окружностью и указан цифрой 2). Если взять номера отсчета и трассы, на которых находится аномалия (рис. 2, б), то окажется что она попадает не в вершину ГОС исходной радарограммы (рис. 2, а), а в перекрестие «усов» (цифра 2 на рис. 2, а).

Принимать решение в этом случае приходится на основании опробований различных вариантов обработки радарограммы, проверяя на какие участки исходной радарограммы указывают аномалии.

В ряде случаев по второму ряду можно оценить толщину обделки, оценив глубину заложения второго ряда и добавив к нему ожидаемую глубину защитного слоя. Граница «плита-грунт» может выделяться до-

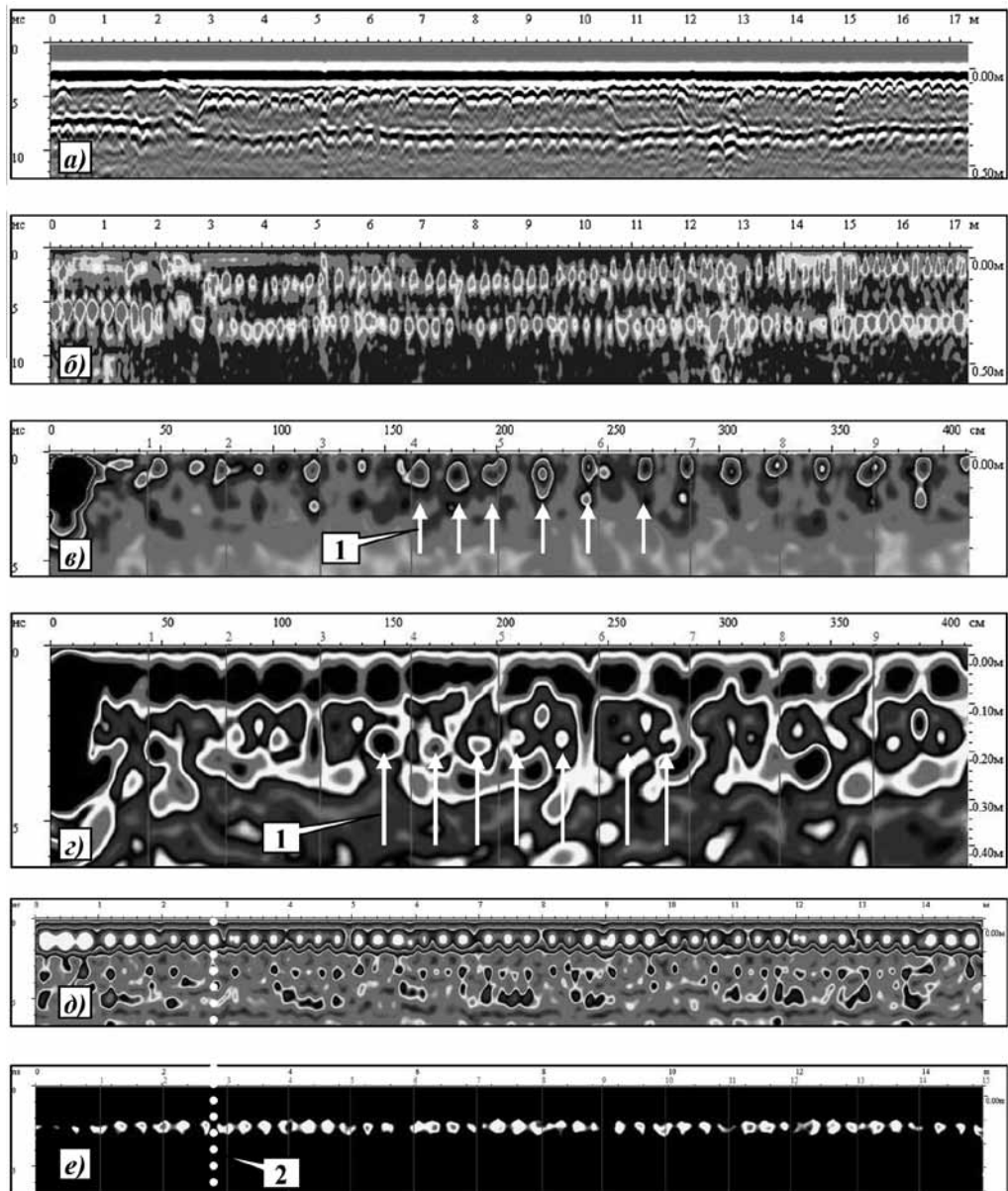


Рис. 3. Примеры выделения нескольких рядов армирования
(Все разрезы кроме а) – смигрированы)

статочно слабо и часто это единственный выход. Причиной здесь является не очень большой контраст по ϵ' границы «плита-грунт» (исключая случаи, когда на границе присутствует вода), но в большей степени это вызывается помеховым влиянием самого армирования. При небольшой толщине обделки пруты армирования (оба ряда) находятся достаточно близко к георадару, поэтому ГОС имеют достаточно длинные «усы», которые накладываются на границу и снижают ее читаемость. В этой ситуации смигрированные радиобразы армирования дают глубину заложения второго ряда арматуры, что позволяет, в том числе, и по нему искать границу «плита-грунт».

То на сколько лучше выделяется 2-й ряд вне влияния 1-го показывает рис. 3, а и б (одна и та же радарограмма в 2-х обработках) – это результат обследования фундамента в коллекторе – здесь присутствует две плиты с однорядным армированием в каждой из них. Подобная структура объекта привела к тому, что сетки армирования разнесены на ~30 см и не мешают друг другу. Рис. 3, а – исходный разрез, б – после ГМ-АПГ, хорошо видны оба ряда. В примере рис. 3, в и г (две обработки, обе с ГМ) – сетки находятся на расстоянии ~10 см, это обычная плита обделки с двурядным армированием. Здесь второй ряд еле удалось выделить (отдельные аномалии указаны стрелками, цифра 1). Тем не менее, те же расстояния в 10 см в случае рис. 3, д и е (2-е обработки, обе с ГМ) позволяют легко видеть ряды в обделке (хотя это не удалось сделать на одной радарограмме и пришлось создавать две разные с разной обработкой). Сопоставляя радарограммы рис. 3, д и е можно заметить, что ряды находятся на разной глубине – при этом специфика обработки (ГМ-АПГ), а так же

то, что максимумы второго ряда находятся не под максимумами первого не позволяет предположить, что речь не идет о выделенных последующих полупериодах отражений 1-го ряда. Детальный анализ также показал, что второй ряд на рис. 3, е не результат пересечения «усов» ГОС.

Возможно, сложности с выделением последующих рядов и границ частично можно снять за счет развития методик обработки данных и выделения признаков наличия армирования в условиях помех. В частности в некоторых случаях удавалось выделять второй ряд после частотного преобразования Гильберта.

3. *Определение толщины защитного слоя (глубины заложения арматуры) и толщины обделки.* Примером решения подобной задачи может послужить рис. 1, б, на котором можно заметить измерение глубины заложения армирования. Успешное решение этих задач зависит от корректной оценки кинематических параметров объекта обследования (которые определяются ϵ'). Обычно предполагается использование калибровочного бурения, после которого становится известна толщина конструкции [4]. Сопоставление времен прихода донного отражения и толщины конструкции позволяет оценить скорость и ϵ' . Проблемой здесь является нежелательность разрушающего воздействия в действующих тоннелях метрополитенов и трудоемкость этих операций. Возможно, выходом в этой ситуации может стать использование ГМ, эффективность которой зависит от правильно подобранной скорости среды, в которой формируются ГОС. Фактически железобетонная плита – объект, насыщенный ГОС-ми, маркерами, указывающими на скорость в ней. Вопрос стоит в выработке характеристики, которая будет оценивать эффективность миграции.

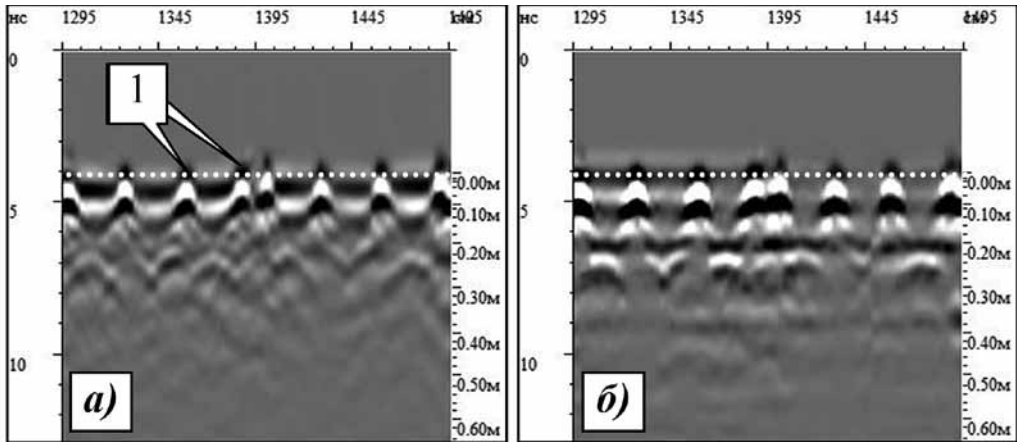


Рис. 4. Оценка толщины защитного слоя: а) – вычитание среднего; б) – вычитание помеховой модели; пунктирная линия – окончание первого полупериода прямой волны

Еще одна проблема связана с необходимостью указать временную точку, которую стоит принять за первое вступление сигнала, отраженного от прута (ситуация обостряется при слишком малых значениях защитного слоя). А также с корректным определением положения нуля глубин. Для георадаров «ОКО-2» существует рекомендация выставлять ноль по концу первого полупериода прямой волны [4; 5]. Однако в некоторых случаях аномалия, которую дает прут присутствует на более ранних отсчетах чем этот временной уровень. Это иллюстрирует рис. 4. Радарограмма дана в двух обработках, направленных на подавление прямой волны (традиционное ВС и методика с вычитанием помеховой модели, которая была из-

ложена в [6]), что бы показать что не обработка вызвала слишком рано начавшуюся аномалию от прута (аномалия указана цифрой 1).

Выводы

Таким образом, среди основных задач георадиолокационного выявления параметров армирования можно назвать: определение шага арматурной сетки, выявление последующих рядов армирования, определение толщины защитного слоя и получение оценок ϵ' . Некоторые из этих задач в конкретных условиях решаются достаточно легко, другие же требуют разработки новых методик. Решениями могут быть: снижение влияние помеховых факторов и разработка критериев, по которым будут приниматься решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С. Теория и методы георадиолокации: Учеб.пособие. – М.: Изд-во «Горная книга», 2008. – 196 с.
2. Еременко А.В., Зверев Е.О., Клепикова С.М., Монахов В.В. Георадиолокация в присутствии железобетонных конструк-

ций // Разведка и охрана недр. – 2004. – № 12. – С. 26–28.

3. Блохин Д.И., Вознесенский А.С., Кудинов И.И., Набатов В.В., Шейнин В.И. Опыт использования геофизических методов для оценки фактических конструктивных параметров железобетонных фундаментных

плит // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 2. – С. 283–289.

4. Рекомендации по проведению георадиолокационного обследования объектов промышленного и гражданского строительства. – г. Раменское: ООО «Логические системы», 2008. – 24 с.

5. Программа управления георадаром «ОКО-2» и визуализации получаемых данных

GeoScan32. Руководство пользователя. Версия 2.5. – г. Раменское: ООО «Логические системы», 2009. – 132 с.

6. Набатов В.В. Повышение эффективности георадиолокационного обследования конструкций тоннелей метрополитенов за счет уменьшения помехового влияния прямой волны // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – Отдельный выпуск № 1. – С. 43–55. **ПДБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Набатов Владимир Вячеславович – кандидат технических наук, доцент,
Гайсин Роберт Мударасович – кандидат технических наук, доцент,
МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: ftkp@mail.ru.

UDC 550.8:[624.19:625.42+624.07]:.693.554

GPR REINFORCEMENT PARAMETERS DETECTION FOR SUBWAY'S TUNNELS AND BUILDING CONSTRUCTIONS TESTING. RANGE OF TASKS AND HINDERING FACTORS

Nabatov V.V., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Gaisin R.M., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Moscow Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
e-mail: ftkp@mail.ru.

The article is devoted to GPR concrete reinforcement parameters detection. It contains examples of nonstandard situations. Range of tasks consist of: rebar spacing estimation, detection of second rebar mat, rebar coverage thickness. Also described hindering factors, which complicate cases solution.

Key words: applied geophysics, nondestructive testing, NDT, tunnel testing, GPR, ground-penetrating radar, georadar, reinforced concrete lining, reinforcement, rebar spacing, second rebar mat, rebar coverage thickness, hindering factors.

REFERENCES

1. Izyumov S.V., Druchinin S.V., Voznesenskii A.S. *Teoriya i metody georadiolokatsii: Ucheb. posobie* (Theory and methods of geo-radiolocation: Educational aid), Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2008, 196 p.
2. Eremenko A.V., Zverev E.O., Klepikova S.M., Monakhov V.V. *Razvedka i okhrana nedr*, 2004, no 12, pp. 26–28.
3. Blokhin D.I., Voznesenskii A.S., Kudinov I.I., Nabatov V.V., Sheinin V.I. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, 2011, no 2, pp. 283–289.
4. *Rekomendatsii po provedeniyu georadiolokatsionnogo obsledovaniya ob'ektov promyshlennogo i grazhdanskogo stroitel'stva* (Guidance on georadar surveying of industrial and civil construction objects), Ramenskoe, ООО «Логические системы», 2008, 24 p.
5. *Programma upravleniya georadarom «OKO-2» i vizualizatsii poluchaemykh dannykh GeoScan32. Ru-kovodstvo pol'zovatelya. Versiya 2.5* (OKO-2 georadar control and data visualization program GeoScan32. User's manual. Version 2.5), Ramenskoe, ООО «Логические системы», 2009, 132 p.
6. Nabatov V.V. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, 2014, special issue no 1, pp. 43–55.

