

УДК 550.837.7

**ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ БЕТОННОЙ ОБДЕЛКИ
ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА НАЛИЧИЕ В НЕЙ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ
С ПОМОЩЬЮ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО МЕТОДА**

В. Д. Барышников, А. П. Хмелинин, Е. В. Денисова

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Представлены результаты обследования обделки подземных горных выработок с целью обнаружения в ней неоднородностей (арматуры, пустот, зон разуплотнения). Даны рекомендации по выбору оптимальных для проходки измерительных скважин участков обделки на основе натурных исследований.

Горная выработка, бетонная обделка, метод георадиолокации, радарограмма, неоднородности, арматура, пустоты

При длительной эксплуатации подземных сооружений с бетонной обделкой в условиях постоянно изменяющихся нагрузок на крепь вопрос контроля действующих в ней напряжений и оценка ее остаточного ресурса имеет важное значение.

При наличии информации о напряженно-деформированном состоянии и механических свойствах вмещающих пород можно оценить действующие в бетонной обделке напряжения аналитически или с помощью численных методов. Наиболее точные результаты обеспечиваются экспериментальными исследованиями. Скважинные геомеханические методы (методы частичной разгрузки [1–3], параллельных скважин [4, 5]) позволяют определить действующие в обделке напряжения. Расчет напряжений по данным измерений осуществляется на основе решения плоской задачи теории упругости, что требует соответствия исследуемого массива изотропной линейно-упругой однородной сплошной среде [4, 5]. Таким образом, при попадании измерительной скважины в зоны нарушения сплошности, пустоты или области, содержащие иные техногенные неоднородности (например, арматуру), результаты измерений будут искажены влиянием указанных факторов, что в свою очередь приведет к недостоверной оценке состояния массива.

Следовательно, качество сооружения скважин, а также пригодность массива для инструментальных исследований значительно влияют на соответствие параметров массива параметрам математической модели. Вопрос выбора пригодного места для сооружения измерительных скважин, при котором возможность попадания в забой скважины неоднородностей массива была бы минимизирована или вовсе исключена, становится особенно актуальным. В связи с этим при проведении исследований авторами решались следующие задачи:

- определение нарушенности обделки и наличия в ней пустот;
- определение места расположения арматуры и оценка ее размеров;

— выбор пригодного участка заложения измерительных скважин с целью исключения попадания по оси скважины арматуры и зон разуплотнения обделки.

НАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И МЕТОДИКА ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ

Экспериментальные исследования структуры и толщины железобетонной обделки горной выработки, обнаружение арматуры и выбор оптимального места бурения измерительных скважин для определения напряжений в бетоне выполнялись с помощью георадара SIR-3000 с комплектом антенн фирмы Geophysical Survey Systems Inc., США (рис. 1).

Принцип работы георадара основан на методе радиолокационного зондирования (георадиолокации) радиоимпульсами с заданной центральной частотой. По виду принимаемого импульсного сигнала формируется радиоволновая картина исследуемой среды, определяется наличие в ней отражающих электромагнитный сигнал неоднородностей (пустот и металлических объектов), имеющих диэлектрическую проницаемость, контрастно отличающуюся от ее значений для крепи и породного массива [6–9].

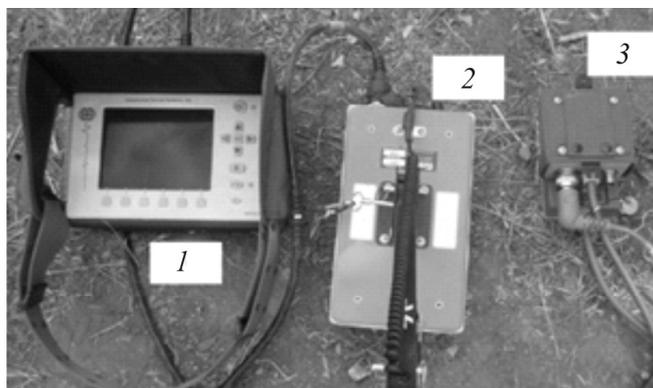


Рис. 1. Оборудование для георадиолокационных исследований: 1 — георадар SIR-3000; 2, 3 — антенны с центральной частотой 900 и 2600 МГц соответственно

В системных параметрах применяемого георадара доступны настройки цветовых схем отображения полученных данных. Стандартная настройка включает в себя цветовую схему, которая представляет собой совокупность оттенков серого, когда наиболее темные участки соответствуют меньшему значению диэлектрической проницаемости (ϵ), а более светлые — ее большему значению [10].

Существующие нормативно-методические документы регламентируют применение георадаров в автодорожном строительстве при обследовании неблагополучных участков автомобильных дорог, в инженерно-геологических и инженерно-гидрологических изысканиях для разработки проектов ремонта и реконструкции дорог, зданий и сооружений, а также контроля качества выполненных работ [11, 12]. В горном деле методы георадиолокации в настоящее время применяются единично, отсутствует методика выявления в крепи подземных сооружений металлической арматуры и зон разуплотнения.

Метод радиолокационного зондирования. Принцип работы георадара предполагает допущение, что слоистая геосреда однородна и не порождает отраженных сигналов от неоднородностей, поскольку отсутствуют участки, различающиеся по электрическим параметрам (диэлектрическая проницаемость, проводимость). Однако арматура и пустоты, присутствующие в железобетонной обделке, являются неоднородностями, вызывающими возникновение отраженных сигналов на границе раздела сред, которые регистрируются приемником георадара и отображаются на дисплее прибора.

Поскольку в георадаре используются щелевые антенны как для приема, так и для излучения сигналов, объединенные в единый приемопередающий блок, расстояние между антеннами (база) не меняется в процессе измерений. При перемещении антенны зондирующие сигналы, отраженные от сосредоточенных неоднородностей (анкер, стержень арматуры, пустота), образуют параболические кривые на радарограммах (рис. 2а). Если объект распределенный (граница раздела слоев бетона или сканирование ведется вдоль протяженной металлической арматуры), то на снимке присутствует прямая, соответствующая границе раздела сред (рис. 2б).

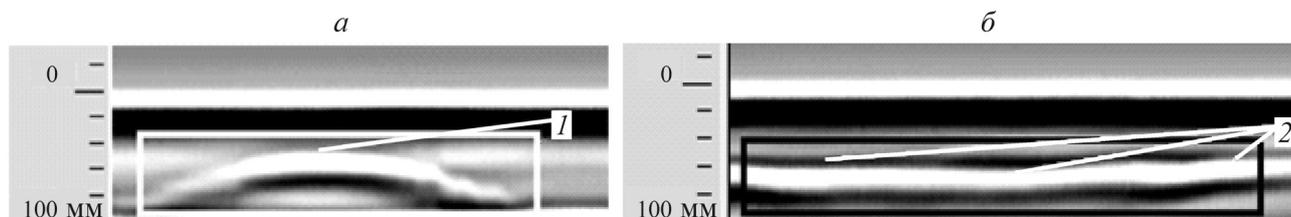


Рис. 2. Радарограммы сигналов, отраженных от характерных неоднородностей: *а* — отражение зондирующего сигнала 1 от металлического стержня при перемещении антенны поперек стержня; *б* — отражение зондирующего сигнала 2 от границ раздела слоев “бетон – воздух”

Георадар излучает короткие электромагнитные зондирующие радиоимпульсы (используется “ударное возбуждение” антенны [6]), причем первой излучается положительная полуволна, которая соответствует белому цвету на снимке. За положительной следует отрицательная полуволна, а завершает импульс — положительная полуволна [10]. Прямому (неинвертированному) радиоимпульсу соответствует чередование цветов “белый – черный – белый” на радарограмме. При отражении от неоднородностей с диэлектрической проницаемостью, большей, чем у вмещающего массива (например, полость в бетоне, заполненная водой, увлажненный слой массива или металлические включения), происходит прямое отражение радиоимпульса, а фаза принимаемого сигнала соответствует фазе излученного: на снимке наблюдается чередование цветов “белый – черный – белый”. В случае, когда диэлектрическая проницаемость неоднородности меньше, чем у вмещающего массива, происходит инвертирование отраженного сигнала, а на снимке наблюдается чередование цветов “черный – белый – черный” [7, 10].

Таким образом, в зависимости от электрофизических параметров неоднородностей георадар регистрирует соответствующие им сигналы. По данным о различии в отражающей способности можно оценить характер неоднородностей, их размеры, геометрическую форму и глубину залегания.

Задачи эксперимента и методика их решения. При выборе площадки, на которой планируется бурение измерительных скважин, необходимо оценить, подходит ли она по техническим возможностям размещения бурового станка и проходки скважин. С помощью высокочастотной антенны необходимо исследовать приповерхностный слой железобетонной обделки на наличие в ней арматуры, пустот и зон нарушения сплошности бетона, определить их размеры и местоположение до глубины 400 мм. Применение антенны с более низкой центральной частотой позволит обнаруживать неоднородности, а также определять мощность обделки и состояние закрепного пространства на глубинах до 1000 мм.

Для повышения точности обнаружения полученные георадарные снимки анализируются на компьютере с помощью программного обеспечения RADAN 6.6. На основе обработанных данных составляются карты расположения арматуры и пустот в бетоне, что позволяет выделить пригодные для бурения участки обделки.

В связи с отсутствием измерительного колеса и измерительной тележки георадара, которые позволяют автоматически синхронизировать снимки с рельефом местности, сканирование бетона следует проводить в режиме “Время”. В этом случае георадар не определяет длину пройденного антенной пути. Привязку к длине сканирования необходимо делать вручную, устанавливая в процессе сканирования измерительные метки через равные промежутки времени. При выполнении измерений на выбранном участке антенна перемещается прямолинейно и равномерно.

Для снижения возможных ошибок сканирования (регистрации сигналов, отраженных от неровностей поверхности, непостоянной скорости перемещения антенны при сканировании) и получения качественных радарограмм перед проведением исследований необходимо выполнять следующие подготовительные работы:

— очистить сканируемую поверхность от пыли, шелушащейся штукатурки и прочих загрязнений;

— произвести шлифовку сканируемой площадки при наличии неровностей и значительной шероховатости*;

— нанести на исследуемый участок координатную сетку, используемую для равномерности проставления измерительных меток и облегчения привязки данных к реальному участку отделки и точного построения карт расположения неоднородностей;

— приготовить макет карты расположения неоднородностей, на котором нанести сетку в соответствии с сеткой на исследуемом участке (далее — карта).

В связи с особенностью работы используемого георадара, для наиболее точного определения пространственных координат неоднородностей и их типа применялась методика исследований, в которой сканирование проводится во взаимно перпендикулярных направлениях, а также с различной ориентацией антенны относительно сканируемой поверхности в вертикальной плоскости.

Работа выполнялась в два этапа.

Первый этап. Для обнаружения неоднородностей в железобетонной отделке горных выработок на глубинах до 400 мм применялась высокочастотная антенна с высокой разрешающей способностью (антенна с центральной частотой 2600 МГц (см. рис. 1)).

После проведения подготовительных мероприятий производились:

— подключение к георадару антенны с центральной частотой 2600 МГц;

— настройка параметров георадара в соответствии с используемой антенной;

— последовательное сканирование участка отделки вдоль горизонтальной линии сетки по оси x путем перемещения антенны от точки 0 до точки 500 мм и проставлением измерительных меток при пересечении центра антенны с вертикальной линией сетки (рис. 3);

— нанесение координат сигналов, отраженных от неоднородностей (параболических кривых или прямых отражения), на макет карты;

— сканирование полосы после того, как верхний край антенны опустится на 100 мм по оси y ;

— сканирование участка отделки до тех пор, пока нижний край антенны не достигнет нижней горизонтальной линии сетки (порядок сканирования по горизонтали представлен на рис. 3).

После завершения горизонтальных сканирований участка отделки выполнялся анализ радарограмм. Определялись места нахождения технологических неоднородностей, наносились на карту и выделялись участки для повторного сканирования с целью уточнения координат этих неоднородностей с оценкой их типов и форм.

* Это позволит снизить переотражения зондирующего сигнала от неровностей поверхности, получить однозначные снимки, облегчить обработку и интерпретацию радарограмм с помощью программного обеспечения RADAN 6.6.

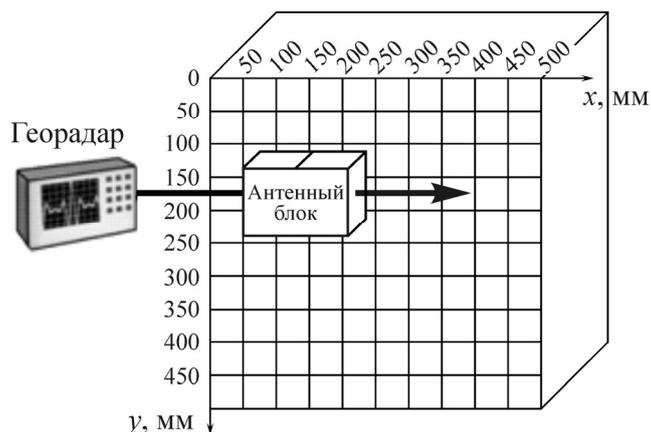


Рис. 3. Схема сканирования железобетонной обделки при перемещении антенны вдоль оси x от точки 0 до точки 500 мм

Затем проводилось вертикальное сканирование путем перемещения антенны вдоль оси y от точки 0 до точки 450 мм, измерительные метки проставлялись при пересечении середины антенны с каждой горизонтальной линией сетки. Далее антенна перемещалась на 100 мм вправо по оси x и указанные действия повторялись. Сканирование проводилось до тех пор, пока правый край антенны не достигал вертикальной линии сетки, соответствующей $x = 500$ мм.

Второй этап. Для выявления зон разуплотнения в крепи на глубинах до 1000 мм использовалась антенна с более низкой центральной частотой 900 МГц. Сканирование проводилось в соответствии с представленным порядком для антенны с центральной частотой 2600 МГц.

После выполнения исследований по двум этапам сканирования осуществляются обработка радарограмм в программе RADAN 6.6 и детальный анализ полученных результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Экспериментальная апробация предлагаемой методики проведена в подземных камерах. Сканирование железобетонной обделки проходило в условиях ограниченного пространства и недостаточной освещенности. Проектная мощность обделки изменялась от 1.5 до 3 м. Всего обследовано три подземных сооружения, расположенных в гнейсах на глубине 250–300 м. Обделка стен изготовлена из бетона марки М140, а свод — из бетона марки М300.

В первой выработке перед проведением георадарных измерений пройдена скважина диаметром 112 мм (рис. 4а). В процессе бурения на глубине 70 мм в забое обнаружен вертикальный металлический стержень диаметром 25 мм. За ним находились два горизонтальных диаметром 10 мм каждый. На участке обделки, прилегающем к скважине, проводилось георадарное сканирование. Обнаружена горизонтально расположенная арматура. Радарограмма, представленная на рис. 4б, содержит участки 1 и 2, соответствующие отражению зондирующего сигнала от горизонтальных металлических стержней.

По оси x на радарограмме (рис. 4б) отмечается расстояние, пройденное антенной по горизонтали, по оси y — глубина расположения неоднородностей.

Отметим, что при сопоставлении результатов бурения со структурой радарограмм определялось значение диэлектрической проницаемости ε , характерное для бетона данной выработки. Для этого использовалось известное соотношение

$$H = vct, \quad (1)$$

где H — глубина залегания арматуры (определена по результатам пробного бурения); v_C — скорость распространения электромагнитного зондирующего импульса в бетоне; t — время распространения сигнала (регистрируется георадаром).

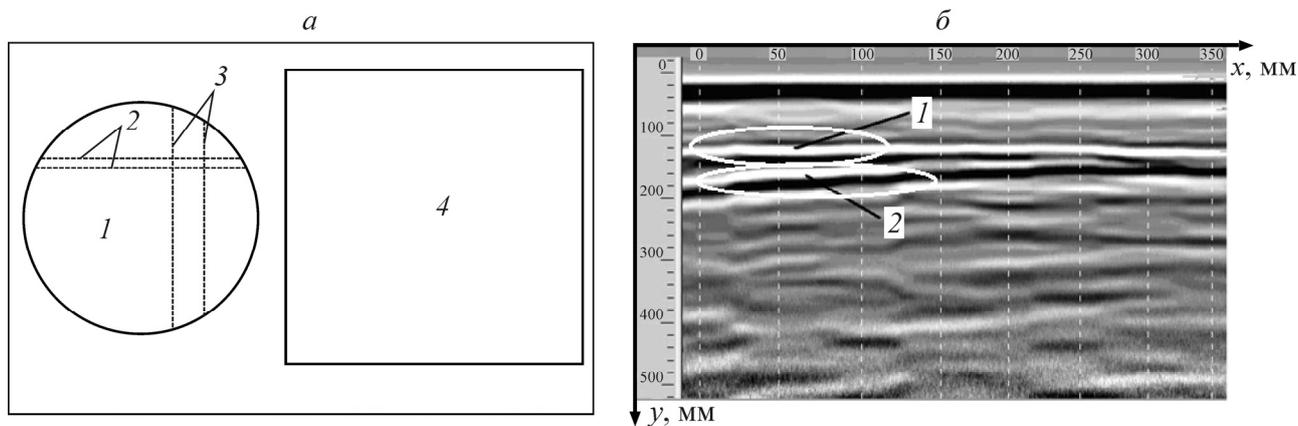


Рис. 4. Экспериментальное определение диэлектрической проницаемости бетона: a — исследуемый участок обделки: 1 — скважина диаметром 112 мм; 2 — горизонтальная арматура диаметром 10 мм; 3 — вертикальная арматура диаметром 25 мм; 4 — область георадарного сканирования; b — горизонтальное сканирование, антенна с центральной частотой 2600 МГц; 1, 2 — горизонтальная арматура на глубине 110 и 160 мм соответственно

Скорость электромагнитной волны в исследуемой среде можно найти из выражения [6, 7]

$$v_C = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}, \quad (2)$$

где c — скорость света в вакууме.

Принимая магнитную проницаемость μ равной единице, а также учитывая (1) и (2), имеем для определения диэлектрической проницаемости бетона простое выражение:

$$\varepsilon = \left(\frac{ct}{H} \right)^2. \quad (3)$$

По формуле (3) получено экспериментальное значение $\varepsilon = 6.25$, которое в дальнейшем использовано для настройки георадара при обследовании остальных выработок.

На рис. 5 приведены радарограммы с сигналами, характерными для различного типа неоднородностей. Наблюдаются три кривые параболического вида, обозначенные цифрой 1, соответствующие металлической арматуре на глубине 90 мм. Ниже на глубине 120 мм располагается зона 2, соответствующая металлическому стержню арматуры (антенна перемещается параллельно стержню). На основе результатов обработки и анализа всех радарограмм, полученных с помощью антенны с центральной частотой 2600 МГц, построена карта расположения неоднородностей, представленная на рис. 5в.

Согласно схеме (рис. 5в), зоны I–IV подходят для бурения измерительных скважин, поскольку не содержат на глубине до 400 мм арматур и значительных по размерам включений в виде пустот. Стержни арматур 1–3 находятся на глубине от 90 до 100 мм, а 4, 5 — на глубине 100–120 мм.

Для выявления арматуры в зонах бурения I–IV на глубинах до 1000 мм применялась антенна с центральной частотой 900 МГц. Результаты георадарного сканирования подтвердили отсутствие технологических неоднородностей в зонах I–IV.

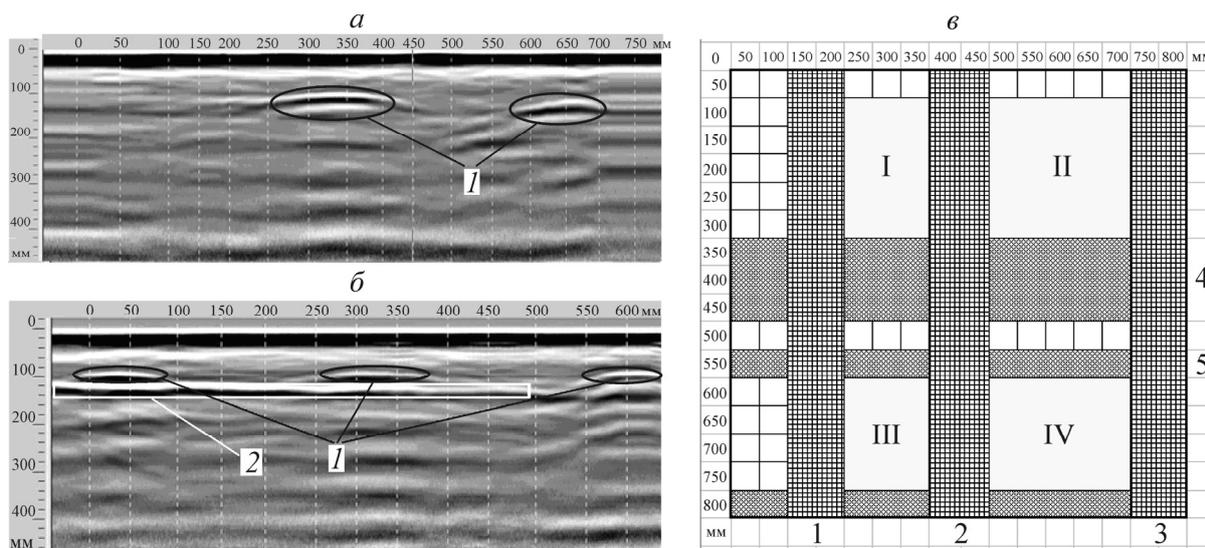


Рис. 5. Радарограммы горизонтального (а) и вертикального (б) сканирования бетонной обделки в своде второй камеры (антенна с центральной частотой 2600 МГц) и схема расположения арматуры (в): 1–5 — места локализации металлических стержней арматуры; зоны I–IV пригодны для бурения

На рис. 6 и 7 представлены радарограммы, полученные при исследовании железобетонной обделки третьей выработки.

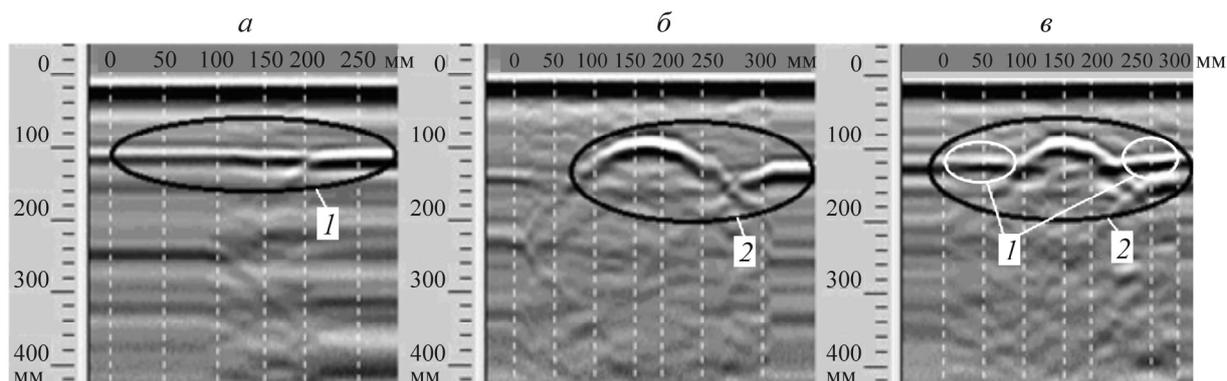


Рис. 6. Радарограммы горизонтального сканирования участка железобетонной обделки третьей выработки (антенна с центральной частотой 2600 МГц): 1, 2 — сигналы, соответствующие металлическому стержню арматуры, расположенному параллельно (1) и перпендикулярно (2) направлению движения антенны

Согласно рис. 6в, вертикальная арматура находится на глубине 80 мм, а ниже располагается горизонтальный стержень арматуры на глубине 110 мм. Глубже неоднородностей видны многочисленные переотражения сигнала от материала обделки с нарушениями сплошности — пустоты или наполнитель бетона.

Радарограммы, полученные при сканировании того же участка обделки третьей выработки антенной с центральной частотой 900 МГц, приведены на рис. 7.

В верхней части радарограмм присутствуют светлые полосы, соответствующие арматуре в приповерхностном слое, обнаруженной при помощи антенны с центральной частотой 2600 МГц. Цифрами 1 и 2 выделены сигналы, отраженные от металлических неоднородностей. Арматура в виде вертикальных и горизонтальных стержней находится на глубинах 450–500 мм. Она об-

наружена и при бурении контрольной скважины. Результаты георадарных сканирований в виде соответствующей карты расположения неоднородностей на участке обделки третьей выработки приведены на рис. 7в. Согласно этим данным, арматура в областях 1–3 находится на глубине от 80 до 90 мм, а в областях 4, 5 — на глубине от 100 до 110 мм. Стержни металлической арматуры 6 находятся на глубине 450–500 мм, также они обнаружены в результате контрольного бурения. В бетоне присутствуют пустоты, но их количество невелико.

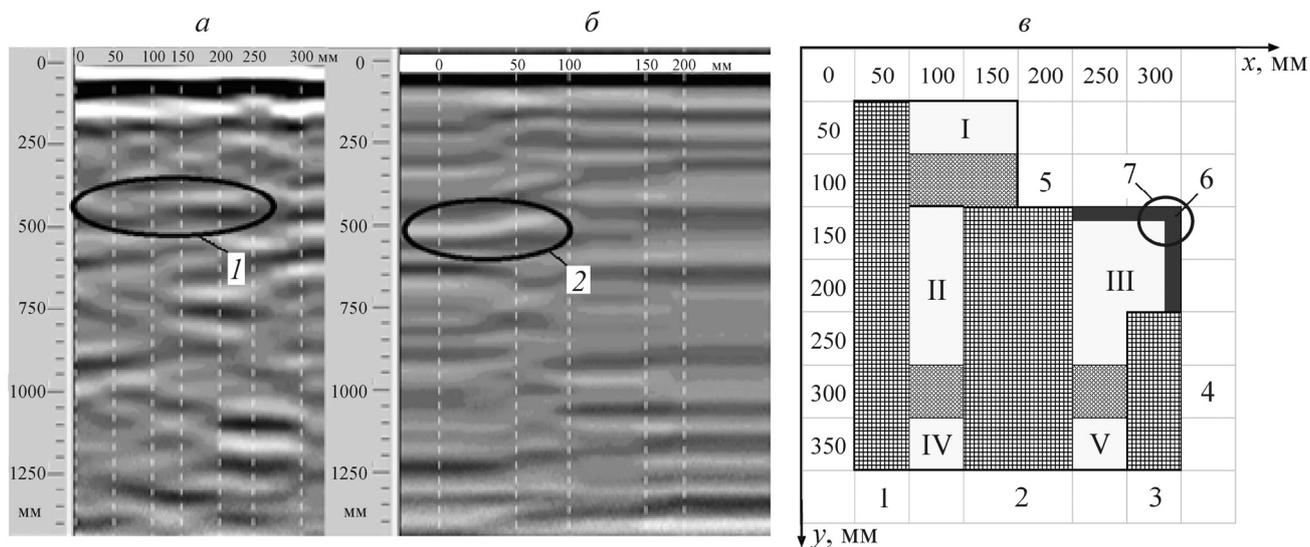


Рис. 7. Радарограммы при вертикальном (а) и горизонтальном (б) сканировании участка обделки третьей выработки (антенна с центральной частотой 900 МГц) и карта расположения арматуры (в); 1–6 — металлическая арматура; 7 — контрольная скважина; зоны I–V пригодны для проходки измерительных скважин

После обработки результатов натуральных наблюдений рекомендованы места, наиболее подходящие для бурения измерительных скважин для геомеханического мониторинга.

ВЫВОДЫ

Выполненный комплекс натуральных экспериментов по диагностике состояния бетонной обделки горных выработок на наличие в ней неоднородностей различного типа с помощью георадиолокационного метода позволил заключить следующее:

— разработана и апробирована в натуральных условиях методика диагностики состояния железобетонной обделки подземных горных выработок с применением георадара SIR-3000, позволяющая обнаруживать наличие неоднородностей и включений в крепи;

— повышение точности определения местоположения включений достигается соответствием принятых исходных параметров работы георадара реальной диэлектрической проницаемости геосреды, уточнять которую необходимо путем сопоставления показаний прибора и данных контрольного бурения в местах наличия неоднородностей. Для условий натуральных исследований получено экспериментальное значение диэлектрической проницаемости (ϵ) бетона, равное 6.25;

— экспериментально доказано, что с помощью радиолокационного метода геоконтроля можно оценивать состояние железобетонной крепи, определять нарушения ее однородности на глубинах до 400 мм при частоте приемопередающей антенны 2600 МГц. Для более глубокого сканирования необходимо применять антенну с более низкой частотой. Антенна с центральной частотой 900 МГц позволяет выявлять неоднородности на глубинах до 1000 мм;

— для увеличения глубины зондирования и диагностики условий взаимодействия крепи на контакте с вмещающими породами (наличие пустот) следует использовать линейку низкочастотных антенн;

— расположение неоднородностей в одной плоскости на разных глубинах затрудняет определение параметров более удаленных объектов вплоть до полной невозможности их обнаружения, что связано со значительным ослаблением мощности проходящего зондирующего сигнала за счет отражения от более близких неоднородностей и затуханием электромагнитных волн, распространяющихся в слабопроводящих средах.

Авторы выражают глубокую благодарность чл.-корр. РАН, проф. В. Н. Опарину за ценные замечания и помощь при работе над статьей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкуратник В. Л., Николенко П. В. Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород: научно-образовательный курс. — М.: МГГУ, 2012.
2. Зотеев О. В. Геомеханика: учеб. пособие для студентов вузов. — Екатеринбург: УГГУ, ИГД УРО РАН, 2003.
3. Руководство по применению метода разгрузки керна с центральной скважиной для определения напряжений в массиве осадочных горных пород. — Новосибирск: Изд. ИГД СО АН СССР, 1969.
4. А. с. № 877005 СССР. Способ определения НДС в массиве горных пород / М. В. Курленя, В. Д. Барышников, Г. Ф. Бобров, С. Н. Попов, В. К. Федоренко // Опубл. в БИ. — 1981. — № 40.
5. Барышников В. Д., Курленя М. В., Попов С. Н. и др. Способ натурного определения упругих свойств горных пород в методе параллельных скважин // ФТПРПИ. — 1982. — №1.
6. Финкельштейн М. И., Мендельсон В. А., Кутев В. А. Радиолокация слоистых земных покровов. — М.: Сов. радио, 1977.
7. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. — М.: Гос. изд-во лит. по вопросам связи и радио, 1960.
8. Владов М. Л., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию: учеб. пособие. — М.: Изд-во МГУ, 2004.
9. Вопросы подповерхностной радиолокации / под ред. А. Ю. Гринева. — М.: Радиотехника, 2005.
10. <http://www.geophysical.com/Documentation/Brochures/GSSI-SIR-3000Brochure.pdf> — Руководство по эксплуатации георадара SIR-3000, размещенное на официальном сайте производителя.
11. Методические рекомендации по применению георадаров при обследовании дорожных конструкций, введены в действие письмом Росавтодора № ОС-28/477 от 28.01.2004, Москва.
12. Положение о порядке производства работ по геофизическому обследованию объектов улично-дорожной сети города Москвы; принято распоряжением Правительства Москвы от 24 июля 2007 г. № 1563-РП.

Поступила в редакцию 16/XII 2013