

УДК 550.837.76

**ОЦЕНКА ТОЛЩИНЫ ДЕФЕКТОВ В ЗОНЕ КОНТАКТА
“БЕТОННАЯ КРЕПЬ – ПОРОДНЫЙ МАССИВ” МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ**

Е. В. Денисова¹, К. О. Соколов², А. П. Хмелинин¹, А. И. Конурин¹, Д. В. Орлов¹

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: slimthing@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,
E-mail: k.sokolov@ro.ru, просп. Ленина 43, 677980, г. Якутск, Россия

Методом георадиолокации исследованы бетонные конструкции на наличие дефектов в виде внутренних слоев. Выявлены зависимости изменения модуля коэффициента отражения сигнала георадара от вариации толщины слоя и электромагнитных свойств заполняющего материала (песок, влажный песок или воздух). В основу экспериментальных и численных исследований положен метод peak-to-peak amplitudes ratio, который позволил определить коэффициенты Френеля для верхней и нижней границ слоя. Минимальная толщина слоя, которую удалось зафиксировать с помощью георадара, составила 2 мм.

Бетонная крепь, внутренний слой, породный массив, метод конечных разностей во временной области, электромагнитные свойства, георадар

DOI: 10.15372/FTPRPI20240208

EDN: KSDOVN

Большинство бетонных и железобетонных конструкций из-за наличия в них различного рода дефектов (полостей, зон расслоения, коррозии арматуры и т. п.) необходимо рассматривать как многослойные структуры. При этом и сам массив горных пород не является однородным. Появление тонких слоев, например в виде трещин (мощностью от одного до нескольких миллиметров), в бетонной обделке или породном массиве может быть признаком повышенного напряженно-деформированного состояния, которое потенциально способно привести к серьезным разрушениям: уменьшению несущей способности бетонных крепей и устойчивости пород вокруг горных выработок [1–2]. Оценка параметров трещин породного массива актуальна при реализации технологии гидроразрыва [3]. Наличие пустотных слоев и трещин приводит к проникновению в них воды и появлению обширных зон обводнения [4]. При обследовании многослойных сред хорошо себя зарекомендовал неразрушающий метод георадиолокации. На каждой границе раздела сред около 25–50 % электромагнитной энергии отражается от слоя, остальная часть проникает в слой и далее снова отражается от границ раздела сред. Таким образом может быть получена информация о толщине слоев и электромагнитных свойствах заполняющих материалов. При использовании ударно-эхового и ульт-

тразвукового методов энергия упругих волн практически полностью отражается от границы раздела сред “воздух – бетон”, что существенно ограничивает их возможности при определении характеристик слоев [5, 6]. В [7] предложен аналитический метод оценки зависимости удельной электрической проводимости среды с включениями в виде эллиптических тонких трещин от их полудлины. Однако метод не дает возможности оценивать размеры самих трещин и свойства заполняющего материала.

Программно-методическое обеспечение георадиолокации позволяет с помощью георадара по параметрам отраженных сигналов (амплитуда, время распространения, спектр) достоверно определять толщину h слоев и их электромагнитные свойства при условии, что длина излучаемой георадаром электромагнитной волны больше h . Бетонные конструкции и расположенный за ними породный массив часто характеризуются наличием слоев, размеры которых существенно меньше длины волны георадара, что требует разработки новых подходов, направленных на повышение точности измерений толщины слоев.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЕВ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

В процессе изучения характеристик слоев методом георадиолокации установлено, что электромагнитные волны отражаются как от нижней, так и от верхней границ слоя и образуют сложный сигнал, который трудно распознать и интерпретировать пользователю георадара. В данной ситуации слой считается обнаруженным, но для количественного определения его толщины и оценки свойств заполняющего материала необходим более глубокий анализ сигнала.

В настоящее время выполняются различные исследования, позволяющие повысить информативность результатов интерпретации георадиолокационных данных. В [8–11] проводилось изучение дорожного покрытия на наличие тонких слоев. С использованием предложенных подходов измерялась толщина слоев асфальтового покрытия и зон его расслоения с точностью до 0.5–1.0 см. В [12–13] обследованы бетонные обделки подземных тоннелей разной толщины с наличием в них полостей различного размера. В [14] георадиолокационными методами изучена внутренняя структура фундаментной плиты на наличие скрытых дефектов с подтверждением результатов измерений бурением кернов. Наиболее подробно применение данного метода представлено в [15]. Рассчитаны коэффициенты Френеля на основе экспериментальных данных, полученных с помощью измерения размаха амплитуд отраженных сигналов (peak-to-peak amplitudes ratio), определены корреляции коэффициента отражения волны от слоя в зависимости от его толщины в длинах волн. В [16] проведен георадиолокационный анализ структуры бетона плотины на наличие тонких трещин и протечек, по результатам которого успешно определяются положение и геометрия трещин внутри бетона и зоны с повышенной влажностью.

Обзор современных подходов к исследованию характеристик слоев внутри бетонных конструкций методом георадиолокации показал, что с помощью георадара можно оценить толщину слоев, заполненных разным материалом (например, воздухом или водой), с точностью до 1 см. Недостаточное внимание уделено проблеме обнаружения тонких слоев и слоев с толщиной, сопоставимой или превышающей длину волны георадара, в особенности заполненных поглощающими материалами. Методы определения толщины слоев, основанные на измерении времени задержки отраженного от слоя сигнала георадара, не обеспечивают высокой точности. Методы, использующие анализ амплитуд отраженных от слоя сигналов георадара, применяются недостаточно широко ввиду отсутствия научно-обоснованных методик обработки данных.

В работе решались следующие задачи:

- исследование аналитической зависимости коэффициента отражения плоской электромагнитной волны от внутреннего слоя с учетом вариации его толщины и электромагнитных свойств заполняющего материала;
- построение численной двумерной модели для расчета коэффициентов отражения от границ раздела сред в зоне контакта “бетонная крепь – внутренний слой – породный массив” на основе измерения размаха амплитуд отраженных сигналов георадара — peak-to-peak amplitudes ratio;
- разработка физической модели бетонной крепи, которая содержит слой, имеющий размеры в длинах волн (λ) от $\lambda/57$ до $\lambda/2$ и заполненный воздухом;
- выполнение сравнительного анализа аналитически, численно и экспериментально полученных коэффициентов отражения на границах раздела сред в зоне контакта “бетонная крепь – внутренний слой – породный массив”. Оценка погрешности расчета коэффициента отражения от внутреннего слоя, заполненного различными типами материалов (воздух, песок, влажный песок) разными способами;
- обоснование возможности применения предложенного метода с помощью анализа размаха амплитуд отраженных сигналов георадара (peak-to-peak amplitudes ratio) для оценки характеристик внутренних слоев (их толщины и электромагнитных свойств заполняющего материала).

МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ

Точное уравнение для расчета коэффициента отражения от слоя без учета потерь в среде получено в [17]. Относительно сейсмических сигналов в [18] установлено, что при уменьшении толщины слоя происходит наложение двух отраженных от границ слоя сигналов. Эта тенденция продолжается до тех пор, пока мощность слоя не станет равной примерно $\lambda/8$. Развитие данного метода предложено в [19], где использовалась зависимость изменения амплитуды отраженного сигнала от перемещения георадара (AVO — amplitude versus offset). Сделано предположение, что горизонтально-слоистая среда имеет предельную толщину слоя, ниже которой необходим тонкослойный AVO-анализ. Для типичного георадиолокационного сигнала этот предел составляет примерно 0.75λ . В дальнейшем в исследованиях характеристик тонких слоев использовались изменения амплитуды и фазы отраженного сигнала георадара (APVO — amplitude phase versus offset method) [20].

В рамках данной работы изучалось влияние толщины слоя и свойств материала, его заполняющего, на коэффициент отражения сигнала георадара от слоя. Рассмотрим падение электромагнитной волны под углом β_1 на границу раздела сред для трехслойной модели “бетонная крепь – внутренний слой – породный массив” (рис. 1). На поверхности слоя 3 с действительной частью комплексной диэлектрической проницаемости (далее диэлектрической проницаемостью) ε'_3 и проводимостью σ_3 лежит слой 2, характеризующийся диэлектрической проницаемостью ε'_2 , проводимостью σ_2 и имеющий толщину h . Источник излучения находится на поверхности слоя 1 (ε'_1 , σ_1). Магнитная проницаемость всех слоев: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_0$ (μ_0 — магнитная проницаемость воздуха $4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м). Длину волны для каждого слоя можно определить из соотношения $\lambda = v/f$, где v — скорость распространения электромагнитной волны в воздухе ($2.99 \cdot 10^8$ м/с) или в соответствующей среде $v_m = v/\sqrt{\varepsilon_m}$, а f — частота георадара.

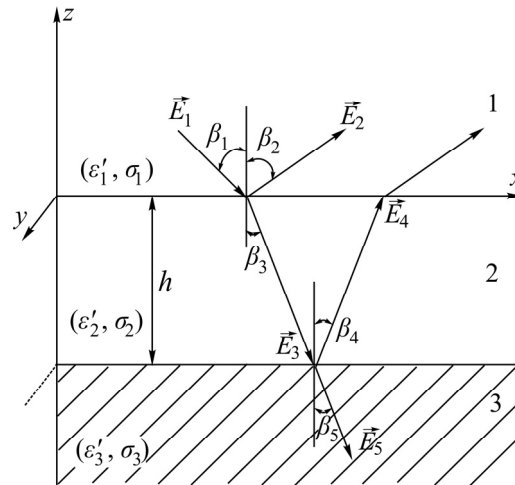


Рис. 1. Схема “отражения–преломления” плоской электромагнитной волны на плоских границах слоя толщиной h для трехслойной модели

При рассмотрении явления “отражения–преломления” плоских волн на слое задача о нахождении коэффициентов отражения и прохождении электромагнитных волн значительно усложняется. Внутри слоя возникает сложный интерференционный волновой процесс, который отличается определенными амплитудными и фазовыми характеристиками. Они количественно зависят от электромагнитных свойств среды и отношения длины электромагнитной волны, падающей на слой, к толщине слоя. Коэффициент отражения от вмещающего слоя (без потерь) синусоидального электромагнитного сигнала в зависимости от его размеров h рассчитывается по формуле Рэлея [17]:

$$V_{\text{сл}} = \frac{V_{12} + V_{23} e^{-i \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_2'} h}}{1 + V_{12} V_{23} e^{-i \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_2'} h}}. \quad (1)$$

Коэффициенты отражения V_{12} и V_{23} на границах раздела сред 1/2 и 2/3 определяются формулами Френеля, позволяющими рассчитывать амплитуды отраженной волны соответствующей поляризации при известной падающей амплитуде на плоскую границу плоской электромагнитной волны. При нормальном падении электромагнитной волны на границу раздела сред, формулы Френеля имеют вид:

$$V_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}; \quad V_{23} = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}, \quad (2)$$

где Z_1 , Z_2 и Z_3 — характеристические импедансы сред 1–3 [21] определяются выражениями: $Z_1 = 1/\sqrt{\epsilon_1'}$, $Z_2 = 1/\sqrt{\epsilon_2'}$, $Z_3 = 1/\sqrt{\epsilon_3'}$. Для случая, когда электромагнитные свойства породного массива и бетона можно принять одинаковыми $Z_1 = Z_3$, коэффициенты отражения на верхней и нижней границах слоя 2 будут связаны соотношением $V_{12} = -V_{23}$.

Для слоев толщиной меньше, чем $\lambda/11$, коэффициент отражения имеет линейную зависимость от толщины слоя по отношению к длине волны [17]:

$$V_{\text{сл}} \cong 4\pi \frac{V_{12}}{1 - V_{12}^2} \cdot \frac{h}{\lambda}. \quad (3)$$

Коэффициент отражения с учетом поглощения электромагнитных волн в слое [22]:

$$V_{\text{сл}} = \frac{V_{12} + V_{23} e^{\frac{-2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_2} \text{tg} \delta h} e^{-i \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_2} h}}{1 + V_{12} V_{23} e^{\frac{-2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_2} \text{tg} \delta h} e^{-i \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_2} h}}, \quad (4)$$

где $\text{tg} \delta = \sigma_2 / (2\pi f \varepsilon_2 \varepsilon_0)$ — тангенс угла потерь находится как соотношение действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости материала, заполняющего слой 2 — ε'_{2k} .

Для аналитических расчетов зависимости модуля коэффициента отражения плоской электромагнитной волны от плоского слоя взяты за основу (4). Данная формула получена для непрерывного синусоидального сигнала и позволяет учитывать поглощающие свойства материала, заполняющего слой. В реальных условиях георадар излучает сверхширокополосный импульсный сигнал, что отразится на погрешностях при сравнении аналитических расчетов с результатами численного и физического моделирования.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Численное моделирование реализовано с использованием программного обеспечения grtMax, в основе которого используется метод конечных разностей во временной области — Finite-Difference Time-Domain (FDTD) [23 – 27].

С помощью grtMax для центральной частоты георадара 2.6 ГГц выполнено моделирование около 60 сценариев с вариацией толщины слоя и электромагнитных свойств заполняющего его материала в соответствии со следующей методикой:

Блок 1. Подготовка исходных данных.

1.1. Создание трехслойных геометрических двумерных моделей посредством программной среды Python в формате Portable Network Graphics (PNG);

— с плоскими границами раздела сред;

— с использованием идеального отражателя (металлической пластины).

1.2. Конвертация изображений из формата PNG в HDF5 для реализации в программной среде grtMax.

1.3. Создание TXT файла, содержащего информацию об электромагнитных свойствах всех используемых при моделировании материалов.

Блок 2. Численное моделирование.

2.1. Создание входного файла для grtMax (формат IN) с использованием геометрической модели (формат HDF5) и файла со свойствами материалов (формат TXT). Определение условий для моделирования: define domain conditions, time window и т. д.

2.2. Реализация всех сценариев численного моделирования посредством grtMax.

2.3. Построение A-scans (трасс георадиолокационных сигналов) для каждого сценария моделирования.

Блок 3. Реализация метода peak-to-peak amplitudes ratio.

3.1. Измерение peak-to-peak амплитуд волны, отраженной от плоских границ слоя и от идеального отражателя.

3.2. Расчет коэффициентов Френеля и коэффициента отражения от слоя с учетом изменения его толщины и свойств заполняющего материала.

3.3. Сравнение результатов численного моделирования и аналитических расчетов.

Для слоистой структуры, представленной на рис. 1, электромагнитные свойства слоев 1 и 3 равны электромагнитным свойствам бетона ($\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 5.32$; $\sigma_1 = \sigma_3 = 0.0326$ См/м), тогда $Z_1 = Z_3$, а коэффициенты отражения на верхней и нижней границах связаны соотношением $V_{12} = -V_{23}$.

Для численного моделирования применялась геометрическая модель, построенная с использованием интерактивной среды Jupyter Notebook и языка программирования Python. Однородные двумерные модели получены с помощью библиотеки PIL и ее модулей Image и ImageDraw. На первом этапе создания модели вводятся исходные параметры: линейные размеры слоев, объектов и расстояния между ними. Далее посредством функций `rectangle` и `ellipse` из библиотеки ImageDraw формируются слои и объекты. Каждому слою / объекту присваивается определенный цвет, который в дальнейшем применяется для идентификации их электромагнитных параметров в `grfMax`. На втором этапе создается текстовый файл, устанавливающий соответствие между используемыми в модели цветами и электромагнитными свойствами материалов. На последнем этапе размер полученного изображения приводится к требуемому для моделирования с помощью функции `resize`.

Электромагнитные свойства сред [28] и параметры модели приведены ниже:

Размеры бетонных блоков (x, y, z), мм	600, 250, 100
Толщина слоя между блоками h , мм	2 – 90
Шаг перемещения приемо-передающей антенны, мм	10
Диэлектрическая проницаемость песка ε_2	15
Проводимость песка σ_2 , См/м	0.035
Диэлектрическая проницаемость влажного песка ε_2	30
Проводимость влажного песка σ_2 , См/м	0.15

На рис. 2 представлены сигналы георадара, отраженные от слоя разной толщины h , заполненного воздухом и расположенного внутри бетона на глубине 100 мм (в качестве зондирующего импульса используется импульс Ricker с центральной частотой 2.6 ГГц).

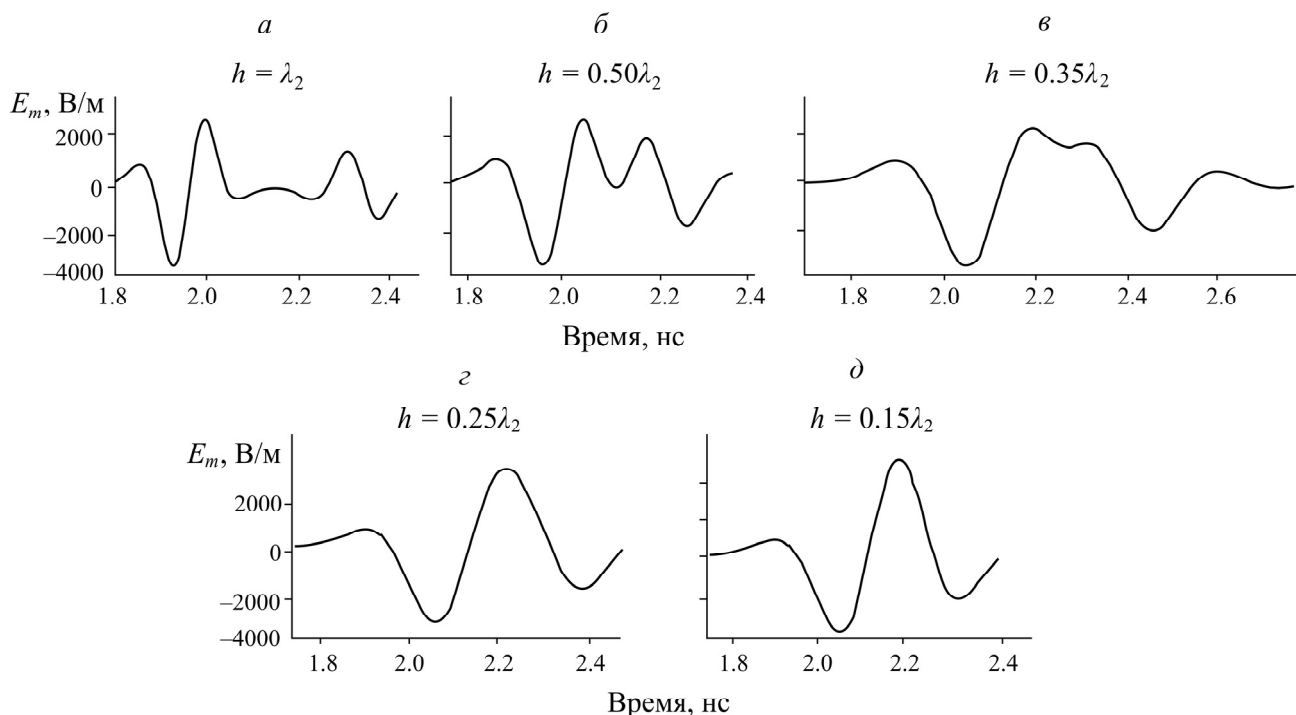


Рис. 2. Амплитуды сигналов георадара, отраженные от границ слоя различной толщины h , заполненного воздухом, в бетоне на глубине 100 мм: *а* — нет наложения сигналов; *б, в* — частичное наложение сигналов; *г* — полное наложение сигналов; *д* — результирующий сигнал имеет форму производной исходного

Согласно результатам моделирования, для слоев толщиной, сопоставимой с длиной волны, размеры слоя можно оценивать по временному интервалу между двумя сигналами, отраженными от верхней и нижней границ слоя. Для более тонких слоев такой метод не подходит, так как импульсные сигналы, отраженные от границ слоя, перекрываются.

В [15, 29] предложен метод определения толщины слоя на основе измерения размаха амплитуд сигналов, отраженных от границ слоя, по отношению к размаху амплитуды сигнала, отраженного от идеального отражателя (peak-to-peak amplitudes ratio), если материал, заполняющий слой, известен. Подтверждено, что для слоев, заполненных воздухом, размерами меньше, чем $\lambda/11$, коэффициент отражения имеет линейную зависимость от толщины. Слои с $\lambda/100$ также различимы на радарограммах, что обосновывает применение метода георадиолокации для измерения тонких слоев [29].

Для оценки характеристик слоев взят за основу метод peak-to-peak amplitudes ratio, предложенный в [15]. С целью получения идеального отражения и последующих вычислений коэффициентов V_{12} и V_{23} внутри плоского слоя размещена неоднородность в виде идеального отражателя — металлической пластины на той же глубине, что и сам слой (рис. 3). Рассматриваемый метод основан только на измерении амплитуд, изменение фазы отраженного сигнала не учитывалось.

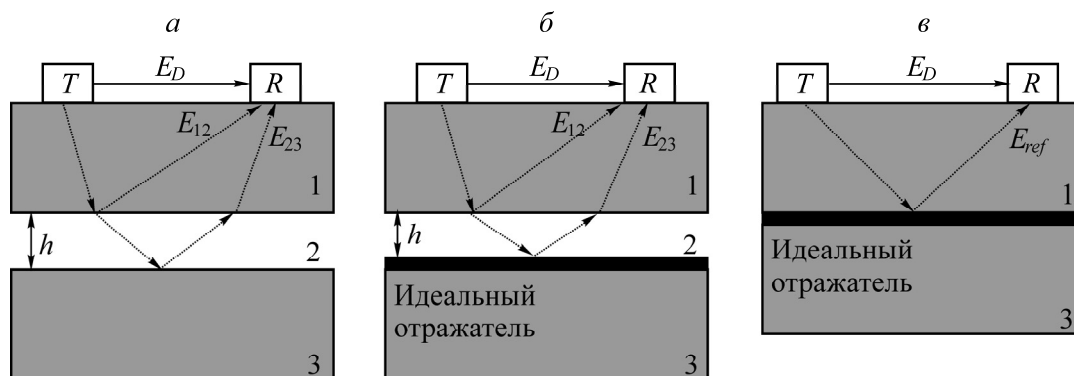


Рис. 3. Отражение электромагнитной волны от слоя с гладкими границами без идеального отражателя (а) и от идеального отражателя в слое толщиной $> \lambda$ (б) и $< \lambda$ (в): E_D — амплитуда сигнала георадара в воздухе, E_{12} и E_{23} — амплитуды электромагнитных сигналов, отраженных на границах раздела сред 1/2 и 2/3; E_{ref} — амплитуда электромагнитного сигнала, отраженная от идеального отражателя; T, R — передатчик и приемник георадара соответственно

На рис. 4 приведен результат измерения peak-to-peak амплитуды сигнала на полученных А-scans для различных материалов, заполняющих слой, и параметров моделирования. Размах амплитуды сигнала представляет собой разницу между его максимальным и минимальным значением. Исследованы также амплитуды сигнала, отраженного от идеального рефлектора.

В данной работе в бетоне или породном массиве была рассмотрена толщина слоев, заполненных воздухом, с волновыми размерами от $\lambda/100$ до $\lambda/2$; и от $\lambda/10$ до 2λ — песком или влажным песком. Аналитически и численно рассчитаны коэффициенты отражений по (4) для различных вариантов. Согласно [15], для расчета коэффициента отражения V_{12} используют отношение размаха амплитуды напряженности электромагнитного поля E_{12} , измеренной на границе сред 1/2, к размаху амплитуды E_{ref} , измеренной при отражении от идеального отражателя и расположенной на той же глубине, что и граница раздела сред 1/2: $V_{12}^* = -E_{12} / E_{ref}$.

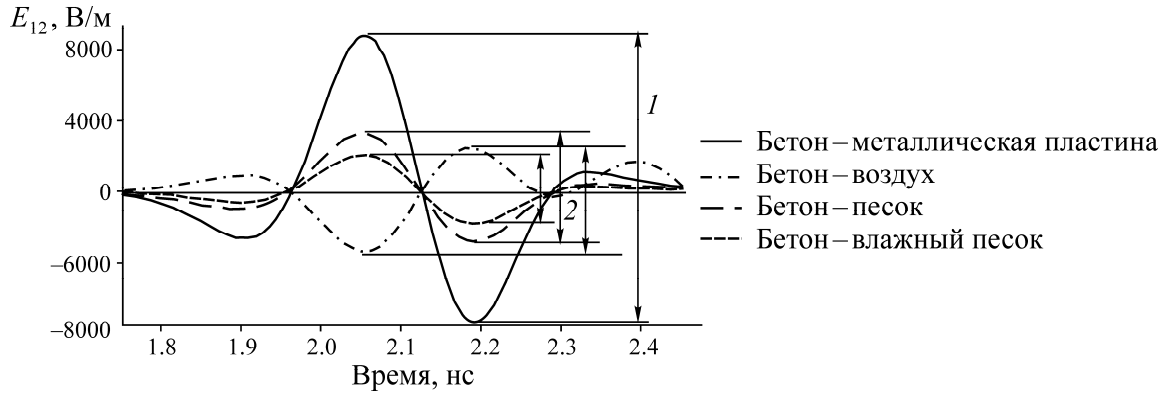


Рис. 4. Результат численного моделирования peak-to-peak амплитуды электрической компоненты электромагнитного поля, отраженной от внутреннего слоя толщиной 5 мм с идеальным отражателем (1) и с разными заполнителями (2), на глубине 100 мм в бетоне

Размещение идеального отражателя над слоем 3 позволит провести измерения peak-to-peak амплитуды напряженности электромагнитного поля E_{23} , отраженной от границы раздела сред 2/3, и в последующем рассчитать коэффициент отражения от слоя $|V_{cl}|$ с учетом изменения его волновых размеров h/λ_2 и электромагнитных свойств заполняющего материала. Найденный с помощью данного метода коэффициент отражения V_{23} от границы раздела сред 2/3 будет учитывать потери в самом слое, которые определяются множителем $e^{(-2\pi/\lambda)\sqrt{\epsilon_2}\tan\delta h}$ в (4) для сред с заполняющим материалом песок и влажный песок, и изменение фазы отраженного сигнала, определяемое множителем $e^{-i(4\pi/\lambda)\sqrt{\epsilon_2}h}$, для всех рассматриваемых материалов (воздух, песок, влажный песок). Следовательно, можно принять, что $V_{23}^* \approx V_{23} e^{(-2\pi/\lambda)\sqrt{\epsilon_2}\tan\delta h} e^{-i(4\pi/\lambda)\sqrt{\epsilon_2}h} \approx E_{23} / E_{ref}$ (далее знаком * отмечены значения коэффициентов Френеля, рассчитанные на основе данных FDTD моделирования). При этом коэффициент отражения от слоя толщиной h , согласно (4), примет вид (*первый способ расчета*):

$$V_{cl} \approx \frac{V_{12}^* + V_{23}^*}{1 + V_{12}^* V_{23}^*}. \quad (5)$$

В табл. 1 представлены полученные на основе данных FDTD моделирования (V_{12}^*) и теоретически рассчитанные по (2) коэффициенты отражения V_{12} на границах раздела сред 1/2.

ТАБЛИЦА 1. Коэффициент отражения на границе раздела сред 1/2

Материал слоя 2	V_{12} по (2)	V_{12}^* по результатам FDTD моделирования	
		для $h < \lambda/4$	для $h > \lambda/4$
Воздух	0.390	от 0.346 (при $h \approx \lambda/4$) до 0.389 (при $h \approx \lambda/10$)	0.303
Песок	0.264	0.289	0.204
Влажный песок	0.408	0.367	0.300

Можно отметить, что измеренный peak-to-peak amplitudes ratio и полученный на основе данных FDTD моделирования коэффициент отражения V_{12}^* зависит от толщины слоя 2 и не может быть рассчитан по (2). Для размеров толщины слоя 2, превышающих $\lambda/4$, V_{12}^* уже учитывает поглощение электромагнитной волны в материале слоя 2: $V_{12}^* \approx V_{12} \cdot e^{(-2\pi/\lambda)\sqrt{\epsilon_2}\tan\delta h}$. В этом случае,

приняв $V_{12}^* = -V_{23}^*$ при $Z_1 = Z_3$, можно осуществлять расчет коэффициента отражения от слоя 2 вторым способом — по (1) без расчета коэффициента V_{23}^* , но с учетом множителя $e^{-i(4\pi/\lambda)\sqrt{\varepsilon_2}h}$, отвечающего за изменение фазы отраженного сигнала:

$$V_{\text{сл}} = \frac{V_{12}^* - V_{12}^* e^{-i\frac{4\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_2}h}}{1 - (V_{12}^*)^2 e^{-i\frac{4\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_2}h}}. \quad (6)$$

Третий способ расчета коэффициента отражения от слоя можно реализовать по соотношению (4) с использованием максимального значения коэффициента V_{12}^* (без учета поглощения) для слоя толщиной менее $\lambda/4$ (заполняющий материал — песок и влажный песок) и менее $\lambda/10$ (заполняющий материал — воздух). В табл. 2 обобщены все три способа расчета коэффициента отражения от слоя.

ТАБЛИЦА 2. Способы расчета коэффициента отражения от слоя $V_{\text{сл}}$

Первый способ: расчет V_{12}^* и V_{23}^* по (5) при $h > \lambda/4$ и $V_{23}^* \approx V_{12}^* e^{\frac{-2\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_2}\text{tg}\delta h}$	Второй способ: расчет по (6) для $V_{12}^* \approx V_{12}^* e^{(-2\pi/\lambda)\sqrt{\varepsilon_2}\text{tg}\delta h}$ при $h > \lambda/4$ и $V_{12}^* = V_{23}^*$	Третий способ: расчет по (4) для V_{12}^* при $h < \lambda/4$ и $V_{12}^* = -V_{23}^* \approx V_{12}^*$
$V_{\text{сл}} \approx \frac{V_{12}^* + V_{23}^* e^{-i\frac{4\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_2}h}}{1 + V_{12}^* V_{23}^* e^{-i\frac{4\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_2}h}}$ <p>Для слоев с $h > 2\lambda$, заполненных материалом с большим поглощением $\varepsilon_2/\varepsilon_1 \geq 6$:</p> $V_{\text{сл}} \approx \frac{V_{12}^* + V_{23}^*}{1 + V_{12}^* V_{23}^*}$	$V_{\text{сл}} = \frac{V_{12}^* - V_{12}^* e^{-i\frac{4\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_2}h}}{1 - (V_{12}^*)^2 e^{-i\frac{4\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_2}h}}$	$V_{\text{сл}} = \frac{V_{12}^* - V_{12}^* e^{\frac{-2\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_2}\text{tg}\delta h} e^{-i\frac{4\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_2}h}}{1 - (V_{12}^*)^2 e^{\frac{-2\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_2}\text{tg}\delta h} e^{-i\frac{4\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_2}h}}$ <p>Для $h < \lambda/11$:</p> $V_{\text{сл}} \approx 4\pi \frac{V_{12}^*}{1 - (V_{12}^*)^2} \cdot \frac{h}{\lambda}$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Относительная погрешность Δ численных измерений коэффициентов отражения от слоя определена по формуле $\Delta = (|V_{\text{FDTD}}| - |V_{\text{сл}}|) / |V_{\text{сл}}| \cdot 100\%$, где $|V_{\text{FDTD}}|$ — рассчитанный по формулам или модуль коэффициента отражения от слоя на основе результатов численного двумерного FDTD моделирования; $|V_{\text{сл}}|$ — теоретически найденное значение.

На рис. 5 представлены аналитические зависимости $|V_{\text{сл}}|$ модуля коэффициента отражения электромагнитной волны от размеров слоя 2 в сравнении с рассчитанными $|V_{\text{FDTD}}|$ тремя способами. Цифрами для каждой точки отмечены относительные погрешности измерений в процентах.

Аналитические зависимости для синусоидального электромагнитного сигнала сравниваются с данными, полученными для реалистичного импульса Ricker, что вносит дополнительную погрешность при сопоставлении результатов.

Погрешность при вычислении модуля коэффициента отражения от слоя $|V_{\text{сл}}|$ обусловлена точностью расчета коэффициента Френеля V_{12} для границы раздела сред 1/2, который зависит от толщины слоя и электромагнитных свойств заполняющего материала.

С учетом заполняющей среды значения погрешности расчета модуля коэффициента отражения от слоя следующие:

- воздух: *первый способ* — 30–185 %; *второй* — 1–22 %; *третий* — 1.0–3.5 % (рис. 5а);
- песок: *первый* — 0.05–27.70 %; *второй* — 9–20 %; *третий* — 3.8–5.0 % (рис. 5б);
- влажный песок: *первый* — 5–17 % (для $h < 2\lambda$) и 0.5–5.0 % (при $h > 2\lambda$); *второй* — 17–32 %; *третий* — 8–11 % (рис. 5в).

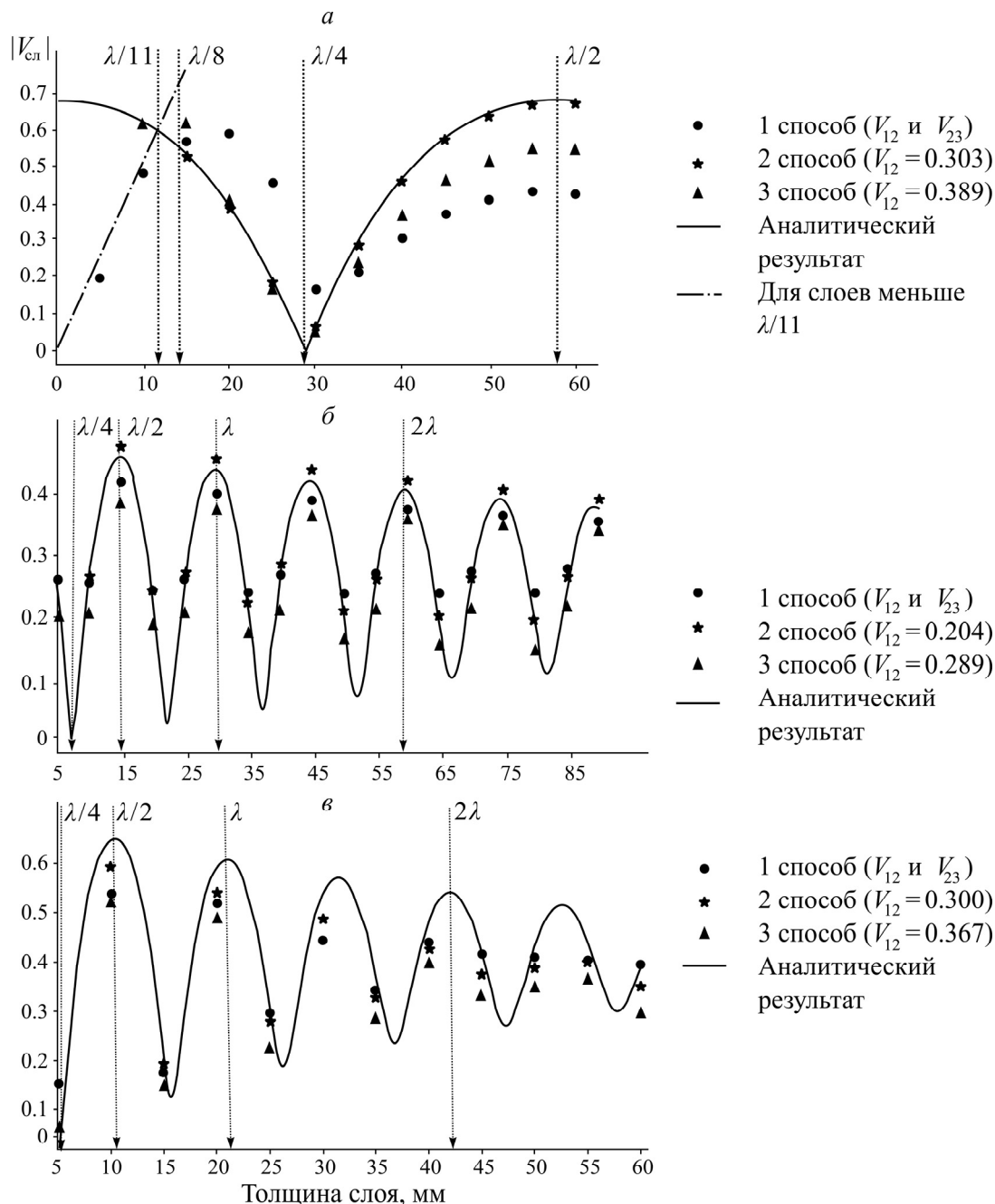


Рис. 5. Зависимость модуля коэффициента отражения сигнала от толщины слоя, заполненного воздухом ($\epsilon_2 = 1$; $\sigma_2 = 0$) (а), песком ($\epsilon_2 = 15$; $\sigma_2 = 0.035$) (б), влажным песком ($\epsilon_2 = 30$; $\sigma_2 = 0.15$) (в) на глубине 100 мм в бетоне ($\epsilon_1 = 5.3$, $\sigma_1 = 0.0326$)

Точность метода вычисления коэффициента отражения от слоя на основе расчета только коэффициента V_{12}^* при условии $h < \lambda/4$ (третий способ) значительно превышает точность метода вычислений вторым способом при V_{12}^* с учетом затухания в слое и первым способом на основе V_{12}^* и V_{23}^* . Это может быть связано с суммированием ошибок при расчете каждого коэффициента. Исключение составили расчеты коэффициентов отражения от слоя влажного песка толщиной, превышающей 2λ , первым способом с точностью до 5.00 %, что требует дополнительных экспериментальных исследований.

Таким образом, можно отметить достаточно высокую точность (в пределах 5 %) третьего способа вычисления коэффициента отражения от слоя, заполненного материалами различного типа, на основе коэффициента отражения V_{12}^* при толщине слоя, не превышающей $\lambda/10$ для воздуха и $\lambda/4$ для песка и влажного песка. Предложенный в [15, 29] метод определения коэффициента отражения от слоя на основе измерения peak-to-peak амплитуд отраженных сигналов георадара показал свою применимость для оценки толщины слоя при известных электромагнитных свойствах заполняющего материала.

Установлено, что, согласно (3), коэффициент отражения от слоя линейно зависит от размеров слоя при его толщине менее $\lambda/11$. Существенные расхождения между аналитическими расчетами и численным моделированием (рис. 5) наблюдались, вероятно, из-за различий в форме сигнала (синус для теоретических исследований и широкополосный импульс для моделирования), а также ввиду небольшой шероховатости поверхности бетона.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Физическая модель спроектирована в соответствии с реальной обделкой горной выработки и состоит из двух слоев [30]. Первый слой (блок 1) представляет собой бетонную обделку и выполнен из бетона без армирования. Нижний, второй слой (блок 3) — породный массив или продолжение бетонной обделки (в случае, если дефект в виде слоя находится в самой бетонной крепи). Измерения проводились на двух гладких бетонных блоках толщиной 100 мм каждый. Между блоками введен слой, заполненный воздухом (рис. 8б). Посредством использования пробкового материала и пластиковых пластин b переменных размеров (2–60 мм) изменялась толщина слоя. Каждая амплитуда реак-to-реак сравнивалась с амплитудой, полученной на идеальном отражателе — слое в виде металлической пластины 2, которая располагалась между блоками 1 и 3 (рис. 8а).

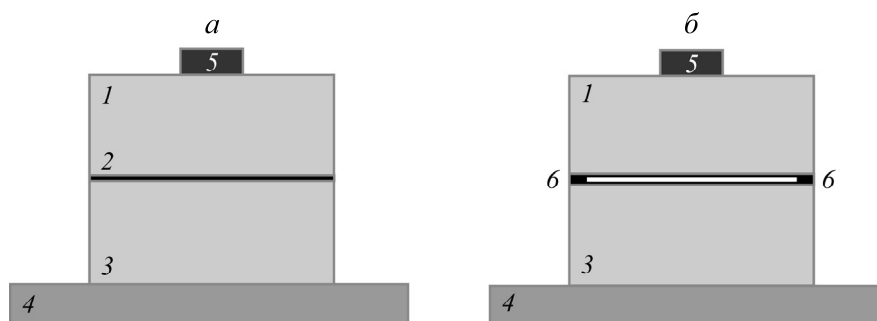


Рис. 8. Схема реализации физического моделирования: а — с металлической пластиной; б — со слоем, заполненным воздухом: 1 и 3 — бетонные блоки $600 \times 250 \times 100$ мм; 2 — металлическая пластина; 4 — полистирол; 5 — антенна георадара; 6 — пробковые или пластмассовые пластины

Вся конструкция экспериментального образца размещена на пластине из полистирола 4, что способствовало уменьшению отражений сигнала от нижней границы модели. Антенна георадара 5 с центральной частотой 2.6 ГГц (модель 52600) перемещалась по поверхности первого бетонного блока 1 (0–600 мм). Полученные радарограммы (В-сканы и А-сканы) обрабатывались с использованием программного обеспечения RADAN 7 и READGS-SI 0.0.22 [31], разработанного для чтения и обработки файлов георадарных данных с приборов, произведенных Geophysical Survey Systems Incorporated (GSSI). Экспериментально измеренная диэлектрическая проницаемость сухого бетона рассчитывалась по формуле $\varepsilon_1^* = (vt / 2h_0)^2$, где h_0 — толщина бетонного блока, t — время распространения сигнала до идеального отражателя определено экспериментально, $\varepsilon_1^* = 3.26$.

На основе результатов физического моделирования произведен расчет коэффициента отражения V_{12}^* на границе раздела сред бетон/воздух, который использовался для определения модуля коэффициента отражения от слоя $|V_{сл}|$ (рис. 9).

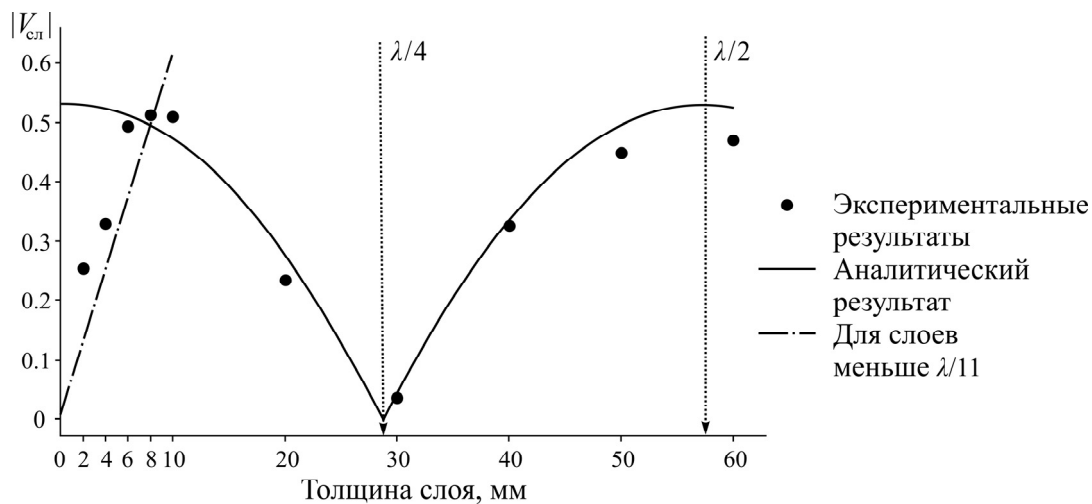


Рис. 9. Зависимость модуля коэффициента отражения сигнала от толщины слоя, заполненного воздухом ($\varepsilon_2 = 1$; $\sigma_2 = 0$) и расположенного в бетоне ($\varepsilon_1^* = 3.26$) на глубине 100 мм

Минимальная толщина слоя, заполненного воздухом, которую удалось измерить георадаром, составила 2 мм (в длинах волн $\approx \lambda/57$). Погрешность расчета модуля коэффициента отражения от слоя на основе экспериментальных данных, полученных с помощью георадара SIR-3000, для слоев толщиной больше $\lambda/11$ — 4.0–15.5 %; для слоев толщиной менее $\lambda/11$ — 33–105 %. С целью повышения точности измерений необходимо использовать дополнительный анализ георадиолокационных сигналов. Предложенный метод показал более высокую точность измерения толщины слоя, чем метод, основанный на расчетах времен задержек сигнала георадара [32].

ВЫВОДЫ

С помощью аналитических, численных и экспериментальных исследований выполнена оценка точности измерения толщины внутреннего слоя в зависимости от его размеров в длинах волн и от электромагнитных свойств заполняющего материала. На основе вычислений коэффициентов Френеля для трехслойной модели бетонной конструкции исследованы модули коэффициентов отражения от слоя, заполненного воздухом, с размерами от $\lambda/100$ до $\lambda/2$ и от $\lambda/10$ до 2λ — песком или влажным песком. Предложены три способа расчета модуля ко-

эффицента отражения от слоя на основе метода peak-to-peak amplitude ratio, который позволил определить коэффициенты Френеля для верхней и нижней границ слоя. Доказано, что для слоев толщиной менее $\lambda/11$ зависимость модуля коэффициента отражения от слоя — линейная. Минимальные толщины слоев в длинах волн, которые удалось зафиксировать с помощью георадара, составили: $\lambda/57$ для воздуха, $\lambda/10$ для влажного песка, $\lambda/15$ для песка.

Точность вычисления модуля коэффициента отражения от слоя определяется точностью расчета коэффициентов Френеля, которая зависит от свойств заполняющего материала и при одинаковых его размерах уменьшается с увеличением поглощения электромагнитного сигнала в слое. Удалось установить, что при высоком уровне поглощения в слое (для среды влажный песок) толщиной, превышающей 2λ , метод вычисления модуля коэффициента отражения от слоя на основе измерения коэффициентов Френеля для границ раздела сред 1/2 — V_{12} и 2/3 — V_{23} обеспечил минимальную погрешность (около 0.15 — 5.5 %).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Feng Peng, Dai Feng, Shuai Kewei, and Wei Mingdong.** Dynamic mechanical behaviors of pre-fractured sandstone with noncoplanar and unparallel flaws, *Mech. Materials*, 2022, Vol. 166. — 104219.
2. **Guo Tengfei, Kewei Liu, Li Xiang, Peng Jin, Jiakai Yang, Zhang Aimin, and Zou Liansong.** Effect of crack angle and concrete strength on the dynamic fracture behavior of rock-based layered material containing a pre-existing crack, *Archives Civil and Mech. Eng.*, 2023, Vol. 23.
3. **Azarov A., Patutin A., and Serdyukov S.** Hydraulic fracture propagation near the cavity in a poroelastic media, *Applied Sci.*, 2021, Vol. 11. — 11004.
4. **Oudeika M., İlkimen E., Tasdelen S., and Aydin A.** Distinguishing groundwater flow paths in fractured rock aquifers formed under tectonic stress using geophysical techniques: Cankurtaran basin, Denizli, Turkey, *Int. J. Env. Research*, 2020, Vol. 14(5). — P. 567–581.
5. **Bahati P. A., Le V. D., and Lim Y.** An impact echo method to detect cavities between railway track slabs and soil foundation, *J. Eng. Appl. Sci.*, 2021, Vol. 68.
6. **Hussin A. P. and Wang Yudi.** Comparison study of ultrasonic and surface wave methods for crack depth detection in concrete panels, *Academic J. Sci. Technol.*, 2023, Vol. 5. — P. 121–125.
7. **Сизин П. Е., Вознесенский А. С., Кидима Мбомби Л. К.** Влияние длины трещин со случайными параметрами на электрическую проводимость горных пород // *Горные науки и технологии*. — 2023. — № 8(1). — С. 30–38.
8. **Huang Tongxing, Zhang Chaoyang, Lu Dun, Zeng Qiuyu, Fu Wenjie, and Yan Yang.** Improving FMCW GPR precision through the CZT algorithm for pavement thickness measurements, *Electronics*, 2022, Vol. 11.
9. **Wang Siqi, Leng Zhen, Zhang Zeyu, and Sui Xin.** Automatic asphalt layer interface detection and thickness determination from ground-penetrating radar data, *Construction and Building Materials*, 2022, Vol. 357.
10. **He Wenchao, Lai Wallace, Sui Xin, and Giannopoulos Antonios.** Delamination characterization in thin asphalt pavement structure using dispersive GPR data, *Construction and Building Materials*, 2023, Vol. 402.
11. **De Coster Albéric, Van der Wielen Audrey, Grégoire Colette, and Lambot S.** Evaluation of pavement layer thicknesses using GPR: A comparison between full-wave inversion and the straight-ray method, *Construction and Building Materials*, 2018, Vol. 168. — P. 91–104.

12. **Liu Hai, Xie Xiongyao, and Sato Motoyuki.** Accurate thickness estimation of a backfill grouting layer behind shield tunnel lining by CMP measurement using GPR, 14th Int. Conf. on Ground Penetrating Radar, GPR, 2012. — P. 137–142.
13. **Harseno Regidestiyoko, Lee Sung-Jin, Kee Seong-Hoon, and Kim Sungmo.** Evaluation of air-cavities behind concrete tunnel linings using GPR measurements, Remote Sensing, 2022, Vol. 14.
14. **Zerkal E., Kalashnikov A., Lapshinov A., and Tyutyunkov A.** Using ground penetrating radars to detect internal defects in concrete foundation slabs, Vestnik MGSU, 2020, Vol. 15. — P. 980–987.
15. **Van der Wielen Audrey.** Characterisation of thin layers into concrete with ground penetrating radar, 2014.
16. **Ristic A., Bugarinović Ž., Vrtunski M., Govedarica M., and Pajewski L.** Application of GPR in assessing of concrete dam structures health, 2020.
17. **Rayleigh J. W. S.** The theory of sound, Vol. 2, Dover Publications, New York, 1945.
18. **Widess M. B.** How thin is a thin bed? Geophysics, 1973, Vol. 38. — P. 1176–1180.
19. **Bradford J. and Deeds J.** Ground-penetrating radar theory and application of thin-bed offset-dependent reflectivity, Geophysics, 2006, Vol. 71. 10.1190/1.2194524
20. **Deparis J. and Garambois S.** On the use of dispersive APVO GPR curves for thin-bed properties estimation: Theory and application to fracture characterization, Geophysics, 2009, Vol. 74(1). — P. J1–J12.
21. **Kadlec R. and Fiala P.** The response of layered materials to EMG waves from a pulse source, Progress Electromagnetics Research M, 2015, Vol. 42. — P. 179–187.
22. **Зубкович С. Г.** Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. — М.: Советское радио, 1968. — 224 с.
23. **Giannopoulos A.** Modelling ground-penetrating radar by GprMax, Construction and Building Materials, 2005, Vol. 19. — P. 755–762.
24. **Yee K.** Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, IEEE, Trans. Antennas, Propag, 1966, Vol. 14. — P. 302–307.
25. **Kunz Karl and Luebbers Raymond.** The Finite Difference Time Domain Method for Electrodynamics, 1996. — 464 p.
26. **Taflove A. and Hagness S. C.** Computational electrodynamics, Artech house, 2005.
27. **Warren C., Giannopoulos, A., and Giannakis I.** GprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. Comput. Phys. Commun., 2016, Vol. 209. — P. 163–170.
28. **Effects of building materials and structures on radiowave propagation above about 100 MHz [электронный ресурс].** URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.2040-1-201507-S!!PDF-E.pdf
29. **Van der Wielen A., Courard L., and Nguyen F.** Static detection of thin layers into concrete with ground penetrating radar, Restoration Buildings and Monuments, 2012, Vol. 18.
30. **Baryshnikov V., Khmelinin A., and Denisova E.** GPR detection of inhomogeneities in concrete lining of underground tunnels, J. Min. Sci., 2014, Vol. 50. — P. 25–32.
31. **Readgssi 0.0.22 documentation — Readgssi documentation [электронный ресурс].** URL: <https://readgssi.readthedocs.io/en/latest/index.html>
32. **Опарин В. Н., Денисова Е. В., Хмелинин А. П., Соколов К. О., Конурин А. И.** Применение метода георадиолокации в S-диапазоне длин волн при исследовании зоны контакта “бетонная крепь — породный массив” // ФТПРПИ. — 2023. — № 6 — С. 13–30.

Поступила в редакцию 06/II 2024

После доработки 07/III 2024

Принята к публикации 14/III 2024