

УДК 550.837.76

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗОНЫ НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ
ГОРНОЙ ПОРОДЫ МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ**

**Е. В. Денисова¹, К. О. Соколов², А. П. Хмелинин¹,
А. А. Войтенко¹, 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

С помощью методов численного и физического моделирования изучено влияние ширины зоны нарушения сплошности массива и диаметра фракции раздробленной горной породы на параметры георадиолокационных сигналов. Зона нарушения сплошности рассматривалась как слой с шероховатыми границами. Выявлены зависимости между погрешностью измерения ширины такого слоя и размером фракции раздробленной породы.

Породный массив, зона нарушения сплошности, раздробленная порода, диаметр фракции, георадар, метод конечных разностей во временной области

DOI: 10.15372/FTPRPI20250106
EDN: ILCDZX

Зоны нарушения сплошности представляют собой участки массива горных пород, содержащие пустоты или различного рода трещины. Под воздействием горного давления на таких участках формируются неустойчивые области, заполненные разрушенными горными породами. Такие процессы изменяют свойства приконтурного массива горных пород, что приводит к несоответствию между проектным и фактическим состоянием геологической среды и может являться причиной нарушения устойчивости горных выработок. В этой связи разработка подходов к обнаружению и количественной оценке размеров зоны нарушения сплошности способствует предотвращению серьезных разрушений бетонных крепей и самого породного массива.

Существующие методы оценки прочностных характеристик материалов, например ультразвуковой диагностики и томографии, позволяют проводить поиск расслоений, пустот и пористости, определять глубины залегания и размеры таких дефектов. Однако информативность таких методов снижается при заполнении указанных неоднородностей разрушенной породой. Для решения этих проблем возможно применение метода георадиолокации, который успешно используется при изучении многослойных сред, в том числе бетонной обделки

и массива горных пород. Пустоты, заполненные разрушенной породой, усложняют характер распределения электромагнитного поля в геосреде за счет его многократных переотражений на границах раздела сред. Это затрудняет интерпретацию георадиолокационных данных и, как следствие, требует проведения исследований по определению особенностей отражения георадиолокационных сигналов от разрушенной породы.

Согласно теории распространения электромагнитных волн в средах, содержащих пустоты или зоны нарушения сплошности, которые заполнены разрушенной горной породой, в настоящей работе оценивается возможность выявления потенциально опасных участков методом георадиолокации. Помимо измерения ширины таких зон необходимо оценивать и размеры фракций раздробленной породы. Дальнейшее развитие представленных исследований заключается в разработке комплексных методов контроля устойчивости массива горных пород.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗОН НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ИЛИ БЕТОННЫХ СООРУЖЕНИЙ

В настоящее время результаты георадиолокационных исследований используются в таких областях, как гражданское строительство [1], геология и геофизика. Например, при контроле качества бетонных конструкций: оценка состояния мостов [2–4] и бетонных крепей [5–6]; при обнаружении коррозии в строительных конструкциях [7–8]; обследовании автомобильных и железных дорог [9–12]; мониторинге вечной мерзлоты и изучении ледниковой и речной среды [13–15]; выявлении болезней деревьев и измерении их электромагнитных свойств [16–17] и др. С помощью метода георадиолокации контролируется также состояние закрепного пространства при использовании сплошных крепей в горных выработках с целью обеспечения дальнейшей безопасности эксплуатации [18–20]. В основном эти работы направлены на определение местоположения различного рода пустот или трещин, заполненных воздухом, в самой обделке или в зоне контакта “бетонная крепь – породный массив”.

Полученный опыт применения георадара исследования автодорожных покрытий [9–10] и железнодорожных путей [11–12] можно использовать при обнаружении зон, заполненных раздробленной породой, в массиве или в зоне его контакта с бетонной крепью. Оценка параметров слоев с шероховатыми границами при изучении бетонной крепи или зоны ее контакта с породным массивом выполнялась в [18–20], но не учитывалось влияние размера шероховатости на точность измерения толщины крепи или тампонажного слоя за ней. В [21] с применением георадара выявлены зоны нарушения сплошности в породном массиве для изучения движения грунтовых вод. В [22] с помощью метода георадиолокации оценивалась возможность дистанционного картирования полостей за бетонной обделкой участков кровли, склонных к вывалообразованию.

В результате аналитического обзора публикаций по применению метода георадиолокации при обследовании состояния крепей горных выработок и близлежащего закрепного пространства установлено отсутствие актуальных научных исследований по теории отражения электромагнитных волн от поверхности шероховатого слоя, которым является трещина или полость, заполненная разрушенной породой.

Цель настоящей работы — изучение влияния переменных параметров нарушенной области в массиве горных пород (ширины трещин, размеров фракций разрушенной породы) на отраженный электромагнитный сигнал георадара для измерения размеров потенциально опасных зон в процессе эксплуатации подземных горных выработок. Основные этапы при исследовании и контроле свойств горных пород и горнотехнических конструкций следующие:

— выбор аналитической модели для изучения процессов отражения зондирующего электромагнитного сигнала от трещины с однородно шероховатыми границами с учетом влияния переменных параметров (ширины трещины, размеров фракций разрушенной породы);

— создание численной модели для оценки влияния переменных параметров трещины с однородно шероховатыми границами на изменение напряженности электромагнитного поля и точность измерения ширины зоны нарушения;

— проведение физического моделирования зоны нарушения сплошности в бетоне в условиях приближенных к реальным, когда размеры и форма фракций разрушенной породы являются переменными;

— определение зависимости между точностью измерения ширины трещины, заполненной раздробленной породой, и ее размером в длинах волн, а также размером фракции горной породы.

МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ШИРИНЫ ЗОНЫ НАРУШЕНИЯ С ШЕРОХОВАТЫМИ ГРАНИЦАМИ

В научной литературе в основном рассматривались методы оценки характеристик отраженных сигналов георадара от шероховатой поверхности с учетом вариации размеров неровностей. Теоретические и практические исследования выполнялись при решении частных задач, в результате чего получены отрывочные данные, возможность применения которых ограничена. В этой связи к определению характеристик отраженного сигнала от трещины с шероховатыми границами целесообразно подходить следующим образом. Первоначально следует аналитически определить закономерность изменений напряженности электромагнитного поля сигнала, отраженного от слоя с однородно шероховатыми границами при определенных условиях (заданный угол визирования, постоянная частота, одинаковые размеры и формы фракций разрушенной породы, постоянные электромагнитные свойства материалов), от его ширины. Затем необходимо синтезировать численную модель посредством FDTD метода с теми же параметрами и оценить влияние размеров фракции на точность измерения ширины зоны нарушения сплошности. Физическая модель, приближенная к реальным условиям и охватывающая крайние случаи вариантов размеров фракций разрушенной породы (0 – 5 и 40 – 70 мм), позволит экспериментально получить сигналы георадара для сопоставления их характеристик с аналитическими данными и результатом моделирования.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для формирования теоретических основ оценки параметров электромагнитного поля, отраженного от трещины с однородно шероховатыми границами (все участки имеют одинаковые характеристики), решались следующие задачи: расчет коэффициента зеркального отражения плоской электромагнитной волны от двух типов неоднородностей — трещины, заполненной воздухом, и трещины с однородно шероховатыми границами при разных размерах шероховатости; построение аналитической модели, учитывающей связь между размерами обнаруживаемой трещины, размерами фракций разрушенной породы и величиной напряженности отраженного от нее электромагнитного поля. Наличие трещины, заполненной раздробленной породой в массиве горных пород или в зоне контакта “бетонная крепь – породный массив”, позволяет рассматривать такую среду как многослойную. Далее трещину представим как слой, заполненный воздухом или породой с фракцией различного диаметра.

Исследования рассеяния электромагнитных волн на шероховатых поверхностях проводились с 1950-х годов. Интерес к этой теме обусловлен тем, что многие структуры, такие как горные породы, лед, тонкие пленки и т. п., могут быть смоделированы шероховатыми поверхно-

стями. В последние годы понятие шероховатости границ раздела сред стало применяться при моделировании сложных многослойных структур в различных областях [23]. Для случая заполнения трещины разрушенной породой необходимо определять характеристики поля, отраженного от неровной (шероховатой) поверхности, где главным образом используются приближенные методы. В частности, Рэлей [24] и Райс [25] предложили приближенное решение задачи отражения звуковых и электромагнитных волн от шероховатой поверхности с пологими неровностями, высота которых значительно меньше длины облучающей волны. Определение для случая полупроводящей, одномерно шероховатой поверхности и горизонтальной поляризации падающей волны получено в [26], где отражающая поверхность описывается функцией $h(x, y)$.

В [27–28] рассмотрен случай отражения электромагнитных волн от гладкого слоя и установлено, что в зависимости от отношения ширины слоя к длине волны (h/λ) коэффициент зеркального отражения от слоя претерпевает периодические изменения. На практике это явление можно использовать при измерении ширины различного типа дефектов в бетонной облицовке горных выработок или в окружающем ее массиве.

Строгое решение задачи отражения электромагнитных волн от слоя, ширина которого изменяется по случайному закону, практически непреодолимая задача. Можно найти лишь ее приближенное решение для случая, когда верхняя и нижняя граница слоя представляют собой поверхности, описываемые стационарными случайными функциями $h_1(x, y)$ и $h_2(x, y)$ (рис. 1).

При этом ширина такого слоя $h(x, y) = h_1(x, y) - h_2(x, y)$, а его среднее значение $\overline{h(x, y)} = h$. Слой характеризуется диэлектрической проницаемостью ε_2 и проводимостью σ_2 . Пусть направление распространения волны составляет с нормалью к поверхности бетонной крепи угол, близкий к вертикали. Такой угол называют углом визирования.

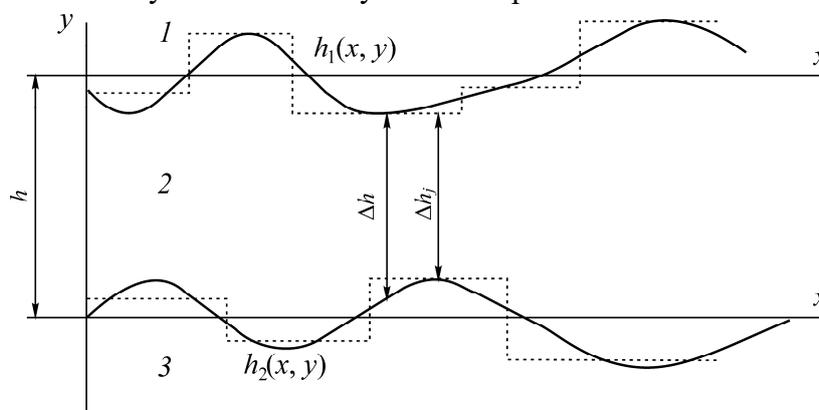


Рис. 1. Структура шероховатого слоя: 1 и 3 — однородный породный массив (или бетон с $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$, $\sigma_1 = \sigma_3$); 2 — слой с раздробленной породой (ε_2, σ_2); Δh_j — ширина элементарных плоских участков слоя

Предположим, что имеется возможность разбить слой на элементарные участки таким образом, чтобы в их пределах слой можно было считать плоским. Тогда остается решить задачу определения параметров электромагнитной волны, отраженной от шероховатой поверхности, коэффициент зеркального отражения которой является функцией ширины слоя в данной точке. Такое предположение можно сделать только в случае, когда углы визирования близки к вертикали, т. е. фронт волны в слое практически параллелен плоским границам элементарных участков. Кроме того, размеры элементарных участков должны превышать длину волны георадара. Коэффициент зеркального отражения элементарного плоского участка описывается выражением:

$$\begin{aligned} \dot{K}_{\text{сл}} &= \frac{\dot{K}_{12} + \dot{K}_{23} \cdot e^{-j2k_2 h}}{1 + \dot{K}_{12} \dot{K}_{23} \cdot e^{-j2k_2 h}} = \dot{K}_{12} + \dot{K}_{23} \cdot e^{-j2k_2 h} - \dot{K}_{12}^2 \cdot \dot{K}_{23} \cdot e^{-j2k_2 h} - \dot{K}_{12} \cdot \dot{K}_{23}^2 \cdot e^{-j4k_2 h} + \dots \approx \\ &\approx \dot{K}_{12} + \dot{K}_{23} \cdot (1 - \dot{K}_{12}^2) e^{-j2k_2 h} - \dot{K}_{12} \cdot \dot{K}_{23}^2 \cdot e^{-j4k_2 h}, \end{aligned} \quad (1)$$

где коэффициенты Френеля \dot{K}_{12} , \dot{K}_{23} — коэффициенты зеркального отражения от границы первой, второй и второй, третьей сред соответственно [26]; волновой вектор отраженной волны: $\dot{k}_2 = 2\pi / \lambda \cdot \cos \beta \sqrt{\varepsilon_2 (1 - j \operatorname{tg} \delta)} = k_{21} - j k_{22}$, $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла потерь, который рассчитывается как соотношение действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости материала, заполняющего слой 2, — ε_2 : $\operatorname{tg} \delta = \sigma_2 / (2\pi f \varepsilon_2 \varepsilon_0)$. Мнимую и действительную части волнового вектора отраженной волны рассчитывают по формулам: $k_{21} \approx 2\pi \sqrt{\varepsilon_2} / \lambda$, $k_{22} \approx 2\pi \sqrt{\varepsilon_2} \operatorname{tg} \delta / 2\lambda$.

Отношение напряженности поля, отраженного от шероховатого слоя зондирующего сигнала $\dot{E}_{\text{сл}}$, к напряженности поля сигнала, отраженного от плоской границы среды $\dot{E}_{\text{пл.гр}}$, имеющей ту же диэлектрическую проницаемость, что и слой, выведено в [26]. Упростим выражение для случая $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$, $\sigma_1 = \sigma_3$:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{E}_{\text{сл}}}{\dot{E}_{\text{пл.гр}}} &= e^{-\frac{\Theta^2}{2}} \left[1 + \left| \frac{\dot{K}_{23}}{\dot{K}_{12}} \right| \cdot e^{-j(2k_{21}h - \frac{\varepsilon_2 \Theta^2}{2} \operatorname{tg} \delta)} \cdot e^{-2k_{22}h + \frac{\varepsilon_2 \Theta^2}{2}} - \left| \dot{K}_{12} \right| \left| \dot{K}_{23} \right| \cdot e^{-j(2k_{21}h - \frac{\varepsilon_2 \Theta^2}{2} \operatorname{tg} \delta)} \cdot e^{-(2k_{22}h + \frac{\varepsilon_2 \Theta^2}{2})} - \right. \\ &\left. - \left| \dot{K}_{23} \right|^2 \cdot e^{-j(4k_{21}h - \pi - 2\varepsilon_2 \Theta^2 \operatorname{tg} \delta)} \cdot e^{-2(2k_{22}h + \varepsilon_2 \Theta^2)} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

здесь $\Theta^2 = (4\pi \Theta_{\text{эф}} / \lambda)^2$ — эффективная площадь рассеяния шероховатого слоя; $\Theta_{\text{эф}}$ — эффективная отражающая поверхность полусферы (одной фракции раздробленной породы). При $\Theta_{\text{эф}} = 0$ и $h \rightarrow \infty$ получим, что $\dot{E}_{\text{сл}} = \dot{E}_{\text{пл.гр}}$. Уравнение (2) можно рассматривать в качестве аналитической модели, учитывающей связь между размерами обнаруживаемой зоны, фракций разрушенной породы и изменением напряженности электромагнитного поля, отраженного от слоя с однородно шероховатыми границами раздела сред по отношению к слою с плоскими границами.

Зависимость отношения $|\dot{E}_{\text{сл}} / \dot{E}_{\text{пл.гр}}|$ от величины h / λ при различных значениях $\Theta_{\text{эф}} / \lambda$ представлены на рис. 2. Расчет проводился по формуле (2) для случая материала слоя 2 — воздух: $\varepsilon_2 = 1$ и $\sigma_2 = 0$. Рабочая частота георадара принята 2.6 ГГц. Однородный породный массив и раздробленная порода (например, силикатные горные породы) моделировались бетоном с электромагнитными свойствами: $\varepsilon_{1,3} = 5.32$ и $\sigma_{1,3} = 0.0326$. На рис. 2 видно, что $|\dot{E}_{\text{сл}} / \dot{E}_{\text{пл.гр}}|$ сильно зависит от размера шероховатости слоя. Чем больше $\Theta_{\text{эф}} / \lambda$, тем меньше соотношение $|\dot{E}_{\text{сл}} / \dot{E}_{\text{пл.гр}}|$, периодичность его изменений с увеличением ширины слоя исчезает, причем резкий переход наступает при $\Theta_{\text{эф}} / \lambda \geq 0.068$. Осциллирующий характер зависимости дифракционного поля от ширины слоя объясняется разностью фаз полей источников Гюйгенса в точке приема.

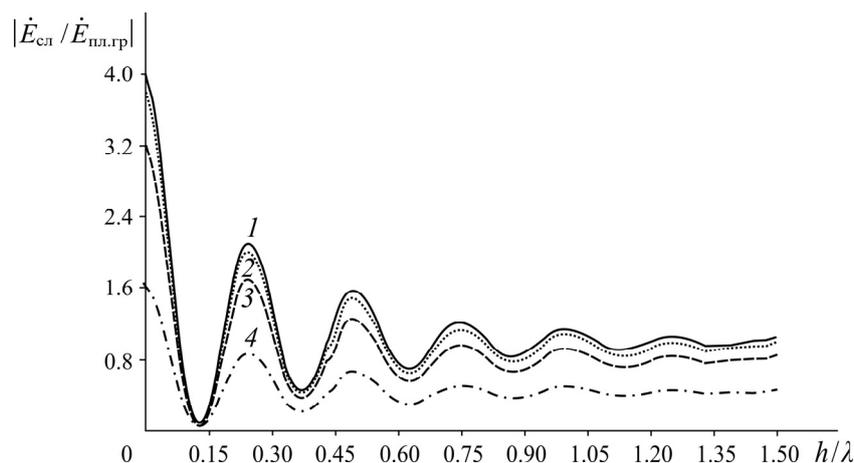


Рис. 2. Зависимость относительного значения напряженности поля, отраженного от слоя с шероховатыми границами, расположенного на глубине 100 мм в породном массиве (или бетоне), от его ширины при $\Theta_{сф} / \lambda$: 1 — 0.00068 (шероховатость 5 мм); 2 — 0.0046 (12.5 мм); 3 — 0.017 (25 мм); 4 — 0.068 (50 мм)

Выполненные аналитические исследования учитывают влияние размеров слоя (h) и фракции породы на сигнал георадара при постоянных значениях угла визирования, глубины расположения слоя, рабочей частоты и свойств используемых материалов. Увеличение диаметра фракции породы и ширины слоя приводит к существенному уменьшению энергии, отраженной от шероховатого слоя, что потенциально служит причиной погрешностей при измерениях. На практике распределение интенсивности электромагнитного поля, особенно на крупных (относительно длины волны) фракциях горной породы, обладает более сложной структурой, связанной с различными типами дифракционных явлений, которые не учитывает предложенная аналитическая модель (2). Численное и физическое моделирование должны подтвердить достоверность выводов, полученных посредством аналитических расчетов в приближенных к реальным условиям.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для реализации численного моделирования рассмотрен вариант заполнения пустотного слоя переменной ширины раздробленной породой разной фракции. В этом случае, как и при реализации аналитических исследований, интерес представляет электромагнитное поле, отраженное от слоя, имеющего с обеих сторон однородно шероховатую поверхность. Цель численного моделирования — оценить точность георадара при измерении ширины зоны нарушения сплошности с учетом вариации ее размеров и диаметра фракций горной породы в условиях нормального падения электромагнитных волн на поверхность шероховатости. Это особенно важно при больших (относительно длины волны) диаметрах и позволит учитывать возникающие на поверхности однородно шероховатого слоя разного рода дифракционные явления. Для достижения поставленной цели построена численная 2D модель однородной среды. В ней содержится заполненный воздухом слой с плоскими границами, а также зона нарушения сплошности при переменных параметрах — размеры фракции породы и ширина такой зоны (остальные параметры остаются неизменными для всех сценариев моделирования). Затем вычислены эквивалентные диэлектрические проницаемости трехслойной геосреды с указанными переменными параметрами за счет использования идеального отражателя

в виде металлической арматуры с последующим определением ширины зоны нарушения сплошности. Далее рассчитаны погрешности полученных численных результатов в сравнении с истинными значениями на фоне аналогичных итогов физического моделирования и выполнена оценка соотношения амплитуд напряженностей электромагнитного поля, отраженных от плоского слоя и от слоя с однородно шероховатыми границами.

Большинство исследователей рассматривают шероховатую поверхность как границу раздела двух сред с различной шероховатостью, распределенной по случайному закону [29–32]. Решение такой задачи — более сложный процесс, позволяющий в итоге количественно оценивать ширину зоны, заполненной разрушенной породой.

Переменными параметрами модели приняты: диаметр фракции щебня (5, 12.5, 25 и 50 мм) и ширина слоя (10, 20, 30, 40, 50, 60 мм). Для случаев, когда диаметр фракции щебня превышал ширину внутреннего слоя, его отражающая поверхность ограничивалась границей нижнего слоя. Остальные параметры модели оставались неизменными. Рассеяние электромагнитного сигнала на однородно шероховатой поверхности оценивалось по отношению к сигналу, отраженному от слоя с гладкими границами. Все сценарии численного моделирования выполнялись в программной среде grgMax [33–34], в основе которой используется метод конечных разностей во временной области — Finite-Difference Time-Domain (FDTD) [35–37].

Для построения геометрической модели применялась интерактивная среда разработки Jupyter Notebook и язык программирования Python. На первом этапе создания модели задаются исходные параметры: линейные размеры слоев 1–3, диаметры фракций щебня и расстояния между ними (рис. 3). Каждому слою/объекту присваивается свой цвет, который в дальнейшем используется для идентификации их электромагнитных параметров в grgMax. На втором этапе создается текстовый файл с электромагнитными свойствами материалов, соответствующих каждому цвету. На последнем этапе размер полученного изображения приводится к требуемому для моделирования с помощью функции `resize`.

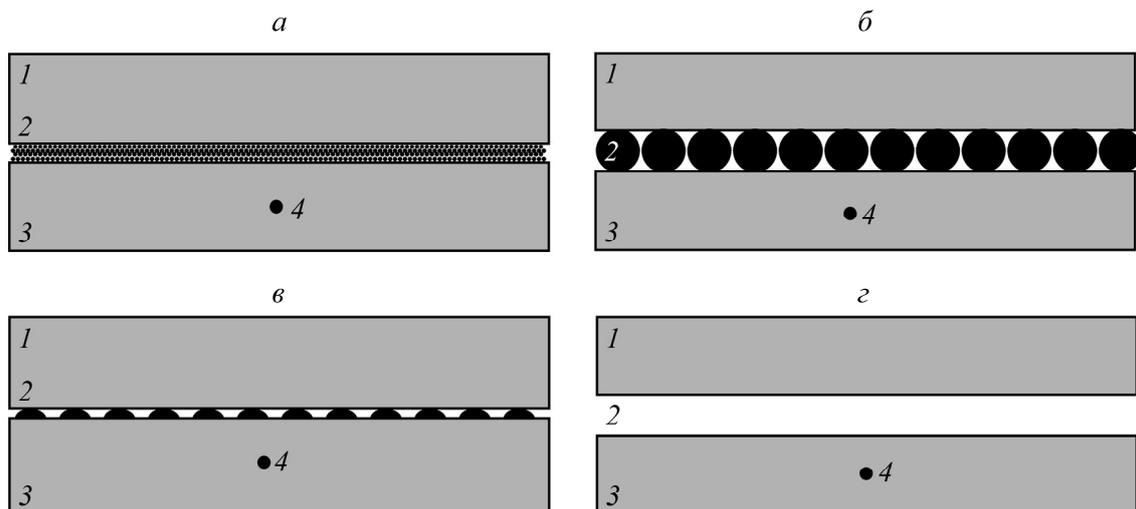


Рис. 3. Геометрические модели породного массива (1, 3) с зоной нарушения сплошности (2) на глубине 100 мм, представленной слоем, заполненным раздробленной породой с фракцией диаметра меньше ширины слоя (а); равной ширине слоя (б); больше ширины слоя (в); слоем с плоскими границами, заполненным воздухом (г). Модели содержат металлическую арматуру (4) в нижнем слое

Металлическая арматура 4 диаметром 10 мм в данном случае используется для формирования гиперболического годографа, с помощью которого можно оценить кажущиеся (эквивалентные) значения диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{\text{ЭКВ}}^*$) и скорости ($v_{\text{ЭКВ}}^*$) распространения электромагнитных волн в исследуемой модели [27]:

$$\epsilon_{\text{ЭКВ}}^* = (vt / 2h_0)^2 \quad \Rightarrow \quad v_{\text{ЭКВ}}^* = \frac{v}{\sqrt{\epsilon_{\text{ЭКВ}}^*}}, \quad (3)$$

где v — скорость распространения электромагнитных волн в вакууме ($2.99 \cdot 10^8$ м/с); h_0 — расстояние до арматуры; t — время распространения сигнала до арматуры, определено по результатам численного моделирования. При известной эквивалентной скорости распространения электромагнитной волны в многослойной среде можно рассчитать ширину слоя с шероховатыми границами по следующей формуле:

$$h_{\text{расч}} = \frac{v_{\text{ЭКВ}}^* (t_2 - t_1)}{2}, \quad (4)$$

здесь t_1 и t_2 — время регистрации сигнала георадара, отраженного от верхней и нижней границ шероховатого слоя соответственно.

Относительная погрешность Δ измерений ширины слоя с шероховатыми границами определялась по формуле $\Delta = (h_{\text{расч}} - h) / h \cdot 100\%$, где $h_{\text{расч}}$ — на основе результатов численного моделирования рассчитанная по (4) ширина слоя; h — истинное значение. Полученные результаты расчетов $\epsilon_{\text{ЭКВ}}^*$ и $h_{\text{расч}}$, а также погрешности вычисления ширины слоя Δ представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчетов эквивалентной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{\text{ЭКВ}}^*$ и ширины зоны нарушения сплошности $h_{\text{расч}}$ на основе численного моделирования

Диаметр фракции, мм	Истинное значение ширины зоны нарушения сплошности, мм									
	20		30		40		50		60	
	$\epsilon_{\text{ЭКВ}}^*$	$h_{\text{расч}}, \text{ м}$ ($\Delta, \%$)	$\epsilon_{\text{ЭКВ}}^*$	$h_{\text{расч}}, \text{ м}$ ($\Delta, \%$)	$\epsilon_{\text{ЭКВ}}^*$	$h_{\text{расч}}, \text{ м}$ ($\Delta, \%$)	$\epsilon_{\text{ЭКВ}}^*$	$h_{\text{расч}}, \text{ м}$ ($\Delta, \%$)	$\epsilon_{\text{ЭКВ}}^*$	$h_{\text{расч}}, \text{ м}$ ($\Delta, \%$)
5	4.4	33 (65)	4.17	45 (50)	4.0	34.6 (13.5)	3.8	58.4 (16.8)	3.5	75.4 (25.6)
12.5	4.86	24.7 (23.5)	4.93	23.9 (20.36)	4.59	39.5 (1.25)	4.41	50.79 (10.4)	5.02	60.03 (1.25)
25	4.93	27.9 (39.5)	4.84	38.4 (28)	4.88	35.3 (11.75)	4.83	57.9 (15.8)	4.74	74.4 (24)
50	5.06	20.3 (1.5)	4.88	40.8 (23)	4.64	44.28 (10.72)	4.7	50.3 (1.73)	4.11	61.4 (2.3)

Согласно полученным результатам численного моделирования, эквивалентная диэлектрическая проницаемость трехслойной геосреды в большинстве случаев снижается с увеличением ширины слоя и повышается с увеличением диаметра фракции горной породы. Наибольшие погрешности измерения ширины зоны нарушения сплошности получены для значений, не превышающих четверть длины волны (20 и 30 мм). Это может быть связано с наложением сигналов отраженных от верхней и нижней границ слоя и возникшей в связи с этим сложностью идентификации времен задержки сигналов. При значениях около половины длины волны

и более (40, 50 и 60 мм) точность измерения ширины однородно шероховатого слоя повышает- ся практически в 2 раза и составляет не менее 25.6%.

Для сопоставления с результатами аналитических расчетов и численного моделирования рассчитаны относительные значения напряженности поля, отраженного от слоя, заполненного раздробленной породой с фракцией разного диаметра $\dot{E}_{\text{сл}}$, к напряженности поля, отраженного от слоя с плоскими границами $\dot{E}_{\text{пл.гр}}$, от его ширины h (рис. 4). Интерполяция по полученным точкам проводилась с помощью кубического сплайна. Построение сплайна осуществлялось с помощью функции CubicSpline из раздела interpolate библиотеки scipy. Полученные кривые отражают поведение функции на каждом отрезке, разделяемом заданными точками. Зависимость $|\dot{E}_{\text{сл}} / \dot{E}_{\text{пл.гр}}|$ от ширины h слоя является периодической, амплитуда и период которой существенно зависят от диаметра фракции раздробленной породы.

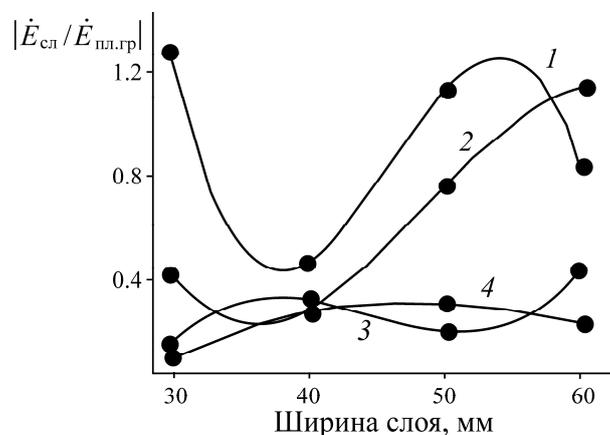


Рис. 4. Зависимость относительного значения напряженности поля, отраженного от слоя, заполненного раздробленной породой с фракцией разного диаметра, к напряженности поля, отраженного от слоя с плоскими границами, от его ширины h (по результатам численного моделирования) и диаметра фракции: 1 — 5 мм; 2 — 12.5 мм; 3 — 25 мм; 4 — 50 мм

Минимум отношения значения напряженности поля, отраженного от шероховатого слоя, к напряженности поля, отраженного от плоской границы среды, имеющей ту же диэлектрическую проницаемость, что и слой, отмечается для диаметров фракций горной породы 5 и 12.5 мм при ширине слоя 40 мм ($\approx 0.35\lambda$), что хорошо согласуется с аналитическим результатом (см. рис. 2).

Максимум соотношения напряженностей поля наблюдается для диаметров фракций горной породы 5 и 12.5 мм при значениях ширины слоя 30 мм ($\approx 0.26\lambda$) и 50–60 мм ($\approx 0.46\lambda$) соответственно, что также хорошо согласуется с аналитическими расчетами.

Для фракций горной породы с диаметрами 25 и 50 мм произошел поворот фазы сигнала. Это может быть связано с большим объемом воздуха между отдельными фракциями породы и влиянием дифракционных явлений, возникающих при падении электромагнитных волн на их крупные (относительно длины волны) гладкие поверхности. Следовательно, размеры фракций внутреннего заполнения зоны нарушения сплошности можно оценить и по изменению фазы электромагнитной волны на границе однородно шероховатого слоя. При больших диаметрах фракции горной породы происходит существенное (более чем в 5 раз) уменьшение энергии сигнала отражения от шероховатого слоя, что является дополнительным интерпретационным

признаком крупности фракций, который будет изучен позднее. Для фракций с диаметром, превышающим половину длины волны, изменение уровня напряженности электромагнитного поля в зависимости от ширины зоны нарушения сплошности несущественно в сравнении с аналогичными результатами для диаметров фракций менее четверти длины волны, что тоже требует дополнительных исследований.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Разработана физическая модель, содержащая внутри однородной структуры бетона зону нарушения сплошности. При этом фракции породы по своему размеру и форме приближены к раздробленному материалу, что позволит реализовать экспериментальные исследования состояния массива или бетонной отделки в условиях спроектированной модели. Целью реализации физического моделирования стала оценка точности измерения ширины слоя раздробленной породы, размеры фракций которой изменяются по случайному закону. Переменной величиной также оставалась ширина самого слоя. Остальные параметры не менялись.

Физическая модель состоит из трех слоев (рис. 5). Верхний и нижний слой (блоки 1 и 3 соответственно) представляют собой породный массив — бетонные блоки толщиной 100 мм каждый. Между блоками 1 и 3 установлена зона нарушения сплошности 2 с переменной шириной h в двух вариантах. Первый — зона заполнялась воздухом (рис. 5а) и имела плоские границы. Изменение ширины моделировалось посредством использования пластмассовых пластин b переменных размеров 20–60 мм. Второй вариант — зона 2 с шероховатыми границами наполнялась щебнем с линейными размерами фракций по ширине и длине 0–5 мм и 40–70 мм, по высоте не превышали ширину слоя 20–60 мм (рис. 5б). Реальная форма фракций щебня отличается от использованной сферической формы при реализации численного моделирования, поэтому далее будем вести речь о линейных размерах фракций щебня (ширине и длине). Толщина фракции щебня не превышала ширину слоя. Для измерения эквивалентной диэлектрической проницаемости трехслойной модели в нижний слой (блок 3) помещен идеальный отражатель в виде металлической арматуры 7 диаметром 10 мм.

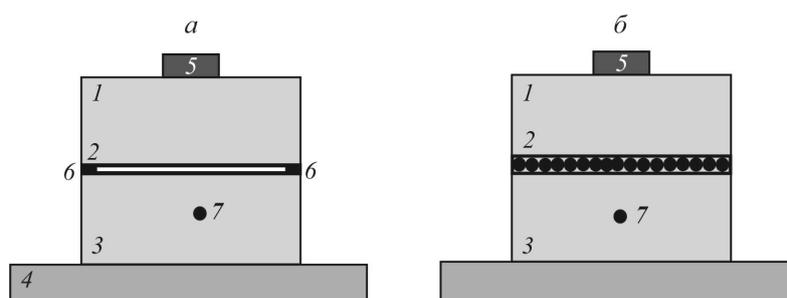


Рис. 5. Схема реализации физического моделирования с вариантами зоны нарушения сплошности 2: а — с плоскими границами (слой заполнен воздухом); б — с шероховатыми границами (слой заполнен щебнем); 1 и 3 — бетонные блоки $600 \times 250 \times 100$ мм; 4 — полистирол; 5 — антенна георадара; 6 — пластмассовые пластины; 7 — идеальный отражатель (арматура)

На основе экспериментально измеренного времени распространения сигнала до арматуры рассчитана эквивалентная диэлектрическая проницаемость и ширина зоны нарушения сплошности с относительной погрешностью по (3), (4) (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчетов эквивалентной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{\text{экв}}^*$ и ширины зоны нарушения сплошности $h_{\text{расч}}$ на основе экспериментальных данных

Линейные размеры фракции раздробленной породы (щебня), мм	Ширина слоя щебня, мм									
	20		30		40		50		60	
	$\epsilon_{\text{экв}}^*$	$h_{\text{расч}}$ (Δ, %)								
0–5	3.11	31.4 (57)	2.57	39.3 (31)	2.60	39.1 (2.5)	2.74	41 (18)	2.65	43.3 (27.7)
40–70	4.10	23.4 (17)	3.57	24.9 (16.8)	3.35	25.5 (36)	2.49	64 (28)	2.49	64 (6.6)

Согласно результатам расчетов, для трехслойной среды с внутренним слоем, заполненным щебнем с фракцией 40–70 мм, эквивалентная диэлектрическая проницаемость в целом выше, чем для среды со слоем, заполненным щебнем с фракцией 0–5 мм. Для всех фракций щебня эквивалентная диэлектрическая проницаемость трехслойной среды с повышением ширины слоя с шероховатыми границами уменьшается. Это может быть связано с тем, что увеличение ширины слоя приводит к росту объема воздуха в нем и к возникновению сложных дифракционных явлений. Для слоев менее четверти длины волны (20 и 30 мм) погрешности измерения ширины слоя несколько превышают погрешности для слоев шириной, сопоставимой с длиной волны и более ее половины (40, 50 и 60 мм).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для сравнения результатов физического моделирования с результатами аналитических расчетов и численного моделирования рассчитаны отношения напряженности поля, отраженного от слоя с шероховатыми границами, к напряженности поля, отраженного от плоской границы среды, имеющей ту же диэлектрическую проницаемость, что и слой — $|\dot{E}_{\text{сл}} / \dot{E}_{\text{пл.гр}}|$, от его ширины h (рис. 6).

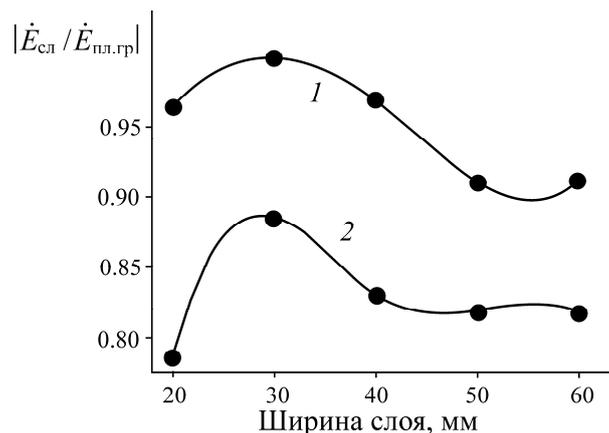


Рис. 6. Зависимость относительного значения напряженности поля от его ширины h (по результатам физического моделирования) для щебня фракции: 1 — 0–5 мм; 2 — 40–70 мм

На рис. 7 представлены результаты численного и физического моделирования, позволившие выявить общие закономерности изменения относительного значения напряженности электромагнитного поля и рассчитанных погрешностей с увеличением ширины слоя.

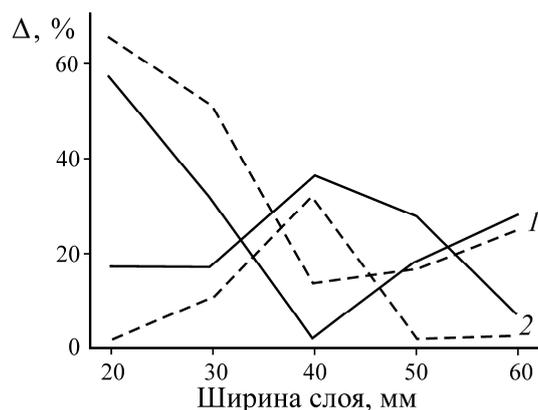


Рис. 7. Зависимость относительной погрешности измерения ширины слоя с шероховатыми границами от его ширины h по результатам численного (штриховая линия) и физического моделирования (сплошная линия) для фракций щебня: 1 — 0–5 мм; 2 — 40–70 мм

Для слоев шириной 30 мм ($\approx 0.26\lambda$) и 50–60 мм ($\approx 0.46\lambda$) при диаметре фракции щебня 0–5 мм получены максимальные погрешности (30–60 %) определения ширины слоя с шероховатыми границами, что соответствует максимальным значениям $|\dot{E}_{\text{сл}} / \dot{E}_{\text{пл.гр}}|$ на рис. 6; для слоев шириной 40–50 мм при диаметре фракции щебня 0–5 мм — минимальные погрешности (2.25–10.7 %) измерений ширины слоя, согласующиеся с минимальными значениями $|\dot{E}_{\text{сл}} / \dot{E}_{\text{пл.гр}}|$.

Для слоев, заполненных щебнем с фракцией 40–70 мм, наоборот, минимальные погрешности (1.5–17 %) зафиксированы при ширине слоя 20–30 мм ($\approx 0.26\lambda$) и 50–60 мм ($\approx 0.46\lambda$), что соответствует минимальным значениям $|\dot{E}_{\text{сл}} / \dot{E}_{\text{пл.гр}}|$ на рис. 6; максимальные погрешности (около 35 %) отмечены при ширине слоя 35–40 мм, они согласуются с максимальными значениями $|\dot{E}_{\text{сл}} / \dot{E}_{\text{пл.гр}}|$. В отличие от результатов численного моделирования (см. рис. 4), при анализе зависимости $|\dot{E}_{\text{сл}} / \dot{E}_{\text{пл.гр}}|$ от ширины слоя не произошло переворота фазы сигнала для щебня фракции 40–70 мм относительно зависимости для щебня с фракцией 0–5 мм (см. рис. 6). Это связано с тем, что в реальных условиях фракция щебня представляет собой не идеальную сферу, а более плоскую структуру, которая обеспечивает плотный контакт.

Достаточная сходимость результатов численного и физического моделирования при крайних значениях размеров фракции горной породы доказывает возможность применения физической модели и для иных промежуточных вариантов. Исследования в рамках данной работы показали актуальность анализа уровня сигнала георадара, отраженного от зоны нарушения сплошности, которая рассматривалась как слой с шероховатыми границами, однако требуется продолжение научных экспериментов. В частности, необходимо применять дополнительные методы обработки сигнала георадара с использованием других переменных параметров (например, электромагнитных свойств материалов, рабочей частоты георадара). Это позволит рассматривать задачу определения не только уровня отраженного сигнала от зоны нарушения сплошности разной шириной, но и обратную задачу — определение структуры материала, ее заполняющего, что существенно

расширит информативность метода георадиолокации при изучении скрытых дефектов в самой бетонной крепи, ее зоне контакта с массивом горных пород и в близлежащем закреплённом пространстве.

ВЫВОДЫ

Получены следующие основные результаты: построены аналитические и численные модели для изучения процессов отражения электромагнитных волн от шероховатого слоя с учетом вариации его ширины и диаметра фракций; создана физическая модель бетонной конструкции с зоной нарушения сплошности, в качестве наполнителя которой используется щебень различной фракции; на основе экспериментальных данных рассчитана эквивалентная диэлектрическая проницаемость геосреды, содержащей слой раздробленной породы, которая уменьшается с увеличением ширины слоя.

Установлено, что с помощью метода георадиолокации можно измерить ширину слоя, заполненного раздробленной породой разной фракции, с приемлемой точностью в зависимости от размера самого слоя и диаметра фракции породы.

Выявлено, что зависимость относительного значения напряженности поля, отраженного от слоя с шероховатыми границами, к полю, отраженному от слоя с плоскими границами, от его ширины носит периодический характер. Максимальные значения этой периодической зависимости соответствуют максимальным погрешностям измерения ширины слоя, заполненного раздробленной породой, минимальные значения — минимальным погрешностям измерений соответственно.

Полученные результаты позволят сформировать основы для обработки георадиолокационных данных при исследовании зон нарушения сплошности зоны контакта “бетонная крепь – породный массив” и самого породного массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zayed T., Dawood T., Abouhamad M., and Alsharqawi M.** Ground penetrating radar (GPR) applications in civil infrastructure systems, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14. — 5682.
2. **Utsi E. and Utsi V.** GPR analysis of bridgedeck construction and the detection of delamination, *Conf. Structural Faults and Repair*, London, 2014.
3. **Abdul Rahman M., Zayed T., and Bagchi A.** Deterioration mapping of RC bridge elements based on automated analysis of GPR images, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14. — 1131.
4. **Gagarin N., Goulias D., and Mekemson J.** Condition rating of bridge decks with fuzzy sets modeling for SF GPR surveys, *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15. — 3631.
5. **Wu X., Bao X., Shen J., Chen X., and Cui H.** Evaluation of void defects behind tunnel lining through GPR forward simulation, *Sensors*, 2022, Vol. 22. — 9702.
6. **Lee S. J., Lee J. W., Choi Y. T., Lee J. S. and Sagong M.** Analysis of GPR signal patterns by tunnel lining thickness and cavity condition. *J. Korean Soc. Railway*, 2020, Vol. 24. — P. 781 – 729.
7. **Eren M., Menguc E., Kocakuşak A., and Helhel S.** Investigation of usage possibility FMCW radar for non-destructive corrosion detection in building structures, *PIERS*, 2023.
8. **Artagan S., Borecky V., Yurdakul Ö., and Lunak M.** Experimental assessment of corrosion influence in reinforced concrete by GPR, 2022.
9. **Wang Siqi, Leng Zhen, Zhang Zeyu, and Sui Xin.** Automatic asphalt layer interface detection and thickness determination from ground-penetrating radar data. *Construction Building Mater.*, 2022. — Vol. 357. — 129434.

10. **He Wenchao, Lai Wallace, Sui Xin, and Giannopoulos Antonios.** Delamination characterization in thin asphalt pavement structure using dispersive GPR data, *Construction and Building Mater.*, 2023. — Vol. 402. — 132834.
11. **Bianchini C. L., Artagan S., Tosti F., Calvi A., Alani A., and Benedetto A.** A GPR spectral-based processing method for minimisation of concrete sleepers effects in railway ballast investigations, 41st Conf. Telecommunications and Signal Processing, 2018.
12. **Artagan S., Bianchini C. L., D'Amico F., Calvi A., and Tosti F.** Non-destructive assessment and health monitoring of railway infrastructures, *Surveys Geophysics*, 2020, Vol. 41. — P. 447–483.
13. **Sudakova M. S. and Malkova G.** Using ground penetrating radar for permafrost monitoring from 2015–2017 at calm sites in the pechora river delta, *Remote Sensing*, 2021. — P. 13.
14. **Bricheva S. S., Gonikov T. V., Panin A. V., Deev E. V., Matasov V. M., Doroshenkov M. M., Entin A. L., and Lobacheva D. M.** The origin of giant dunes in the Kuray Basin (Southeastern Gorny Altai) based on morphometric analysis and GPR studies. *Geomorfologiya*, 2022, Vol. 53, Iss. 4. — P. 25–41.
15. **Matasov V. M., Bricheva S. S., Bobachev A. A., Mironenko I. V., Fedin A. V., Sysuev V. V., Zolotaya L. A., and Roganov S. B.** Landscape mapping using ground-penetrating radar, electrical resistivity tomography survey and landscape profiling, *AIMS Geosciences*, 2022, Vol. 8, Iss. 2. — P. 213–223.
16. **Kocakuşak A., Colak B., and Helhel S.** Frequency dependent complex dielectric permittivity of rubber and magnolia leaves and leaf water content relation, *J. Microwave Power Electromagnetic Energy, International Microwave Power Institute*, 2016. Vol. 50(4). — P. 234–247.
17. **Sudakova M. S., Terentieva E., Kalashnikov A., Seregin I., and Yaroslavtsev A.** Diurnal monitoring of moisture content of scots pine and small-leaved lime trunks using ground penetrating radar (GPR) and increment cores, *Forests*, 2023, Vol. 14. — P. 406.
18. **Li D.-C., Xu C., Cui Z.-D., Chen J.-M., Xu X.-Q., Zhang T.-T., Zhang Z.-W., and Song G.** Mechanical properties of functionally graded concrete lining for deep underground structures, *Adv. Civ. Eng.*, 2022.
19. **Basnet C. and Panthi K.** Roughness evaluation in shotcrete-lined water tunnels with invert concrete based on cases from Nepal, *J. Rock Mech. Geotechnical Eng.*, 2018. Vol. 10(1). — P. 42–59.
20. **Liu H., Xie X., and Sato M.** Accurate thickness estimation of a backfill grouting layer behind shield tunnel lining by CMP measurement using GPR, 14th Int. Conf. Ground Penetrating Radar (GPR), 2012. — P. 137–142.
21. **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. — P. 1–15.
22. **Lalagüe A., Lebens M., Hoff I., and Grov E.** Detection of rockfall on a tunnel concrete lining with ground-penetrating radar (GPR), *Rock Mech. Rock Eng.*, 2016, Vol. 49. — P. 2811–2823.
23. **Tabatabaenejad A., Duan X., and Moghaddam M.** Coherent scattering of electromagnetic waves from two-layer rough surfaces within the Kirchhoff regime, *IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing*, 2013, Vol. 51, No. 7. — P. 3943–3953.
24. **John William Strutt, Baron Rayleigh, and Robert Bruce Lindsay.** The theory of sound, Vol. 1, New York, 1945. — 520 p.
25. **Rice S. O.** Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces, *Communications Pure and Applied Mathematics, Proc. IEE, Part. IV: Institution Monographs*, 1951, Vol. 101, Iss. 7. — P. 351–378.
26. **Зубкович С. Г.** Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. — М.: Сов. радио, 1968. — 224 с.
27. **Опарин В. Н., Денисова Е. В., Хмелинин А. П., Соколов К. О., Конурич А. И.** Применение метода георадиолокации в S-диапазоне длин волн при исследовании зоны контакта “бетонная крепь – породный массив”// ФТПРПИ. — 2023. — № 6. — С. 13–30.

28. Денисова Е. В., Хмелинин А. П., Соколов К. О., Конурин А. И., Орлов Д. В. Оценка толщины дефектов в зоне контакта “бетонная крепь – породный массив” методом георадиолокации // ФТПРПИ. — 2024. — № 2. — С. 96–109.
29. Giannopoulos A. and Diamanti N. Numerical modeling of ground penetrating radar response from rough subsurface interfaces, *Near Surface Geophysics*, 2008, Vol. 6. — P. 357–369.
30. Yang Y., Chen K., and Wang S. Bistatic radar scattering from non-gaussian height distributed rough surfaces, *Remote Sensing*, 2022. — P. 14.
31. Bhogapurapu N., Pandey D., Keesara V., and Putrevu D. Study of subsurface roughness impact on GPR performance using modelling and simulation, *Applications Geomatics Civil Engineering*, 2020. — P. 471–477.
32. Elfouhaily T. and Guérin C.-A. A critical survey of approximate scattering wave theories from random rough surfaces, *Waves in Random Media*, 2004, Vol. 14, Iss. 4.
33. Warren C., Giannopoulos A., and Giannakis I. Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for ground penetrating radar, *Comput. Phys. Commun.*, 2016, Vol. 209. — P. 163–170.
34. Giannopoulos A. Modelling ground penetrating radar by GprMax, *Construction and Building Materials*, 2005, Vol. 19. — P. 755–762.
35. 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.
36. Kunz K. and Luebbers R. *The finite difference time domain method for electrodynamics*, CRC Press, 1996. — 464 p.
37. Taflov A. and Hagness S. C. *Computational electrodynamics*, Artech House, 2005. — 1006 p.

Поступила в редакцию 27/VII 2024

После доработки 24/XII 2024

Принята к публикации 23/I 2025