

А. П. Хмелинин¹, Е. В. Денисова^{1}, А. И. Конури¹, Д. В. Орлов¹*

Моделирование работы георадара при поиске арматуры в бетонной обделке горной выработки посредством программного обеспечения GprMax

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: slimthing@mail.ru

Аннотация: Метод георадиолокации широко применяется для неразрушающего контроля инженерно-технических объектов, в том числе, и для контроля состояния железобетонной крепи подземных горных выработок. Повышение точности интерпретации данных георадиолокационных исследований должно опираться на связи параметров отраженного импульсного сигнала георадара со свойствами вмещающей среды (бетона), и параметрами объекта поиска. В результате аналитических расчетов и численного моделирования получены зависимости параметров отраженного от металлической арматуры импульсного сигнала георадара с учетом вариации диэлектрической проницаемости бетона, глубины залегания и толщины армирующих элементов. Численное моделирование распространения в железобетонной крепи горной выработки зондирующих импульсных сигналов георадара выполнено на основе FDTD метода в программной среде GprMax.

Ключевые слова: электромагнитные свойства, бетон, георадар, FDTD метод, программное обеспечение GprMax, отраженный сигнал

A. P. Khmelinin¹, E. V. Denisova^{1}, A. I. Konurin¹, D. V. Orlov¹*

Simulation of georadar operation when searching for reinforcement in the concrete lining of a mine working using the GprMax software

¹ Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
*e-mail: slimthing@mail.ru

Abstract. One of the possible ways to study the concrete lining of a mine working for the presence of metal reinforcement in it is the use of a georadar. Increasing the accuracy of GPR research data interpretation should be based on regularities between the GPR pulsed reflected signal parameters, the properties of the host medium (concrete), the depth of occurrence, and the geometric dimensions of the reinforcement. Analytical dependences of the GPR pulse signal reflected from the metal reinforcement on the indicated parameters are obtained. Numerical simulation based on the FDTD method in the GprMax software environment was performed for the reflected pulsed signals of a dipole antenna (A-scan) located on the surface of a concrete lining of a mine working containing reinforcement of various diameters.

Keywords: electromagnetic properties, concrete, georadar, FDTD, gprMax, reflection signal

Введение

Георадар - это прибор, в основе работы которого используются высокочастотные электромагнитные волны для реализации методов неразрушающего контроля сред с поглощением [1, 2, 3]. Георадары широко используются в геоло-

горазведке [4], контроле дорожного покрытия [5], обнаружении подземных трубопроводов [6], археологии [7, 8] и т.д. Кроме того, георадары находят свое применение при обследовании железобетонных обделок туннелей [9, 10]. Эти исследования включают оценку повреждений обделки (наличие трещин и зон разуплотнения), оценку качества конструкции (количество и положение стальной арматуры, толщину защитного слоя) и обнаружение пустот и зон обводнения [11, 12, 13]. Однако различные типы неоднородностей в железобетонной обделке туннеля или горной выработки довольно сложно распознать, и это во многом зависит от профессиональных знаний и опыта работы инженера. Поэтому создание стандартного метода идентификации неоднородностей, определение характеристик отраженного от неоднородностей зондирующего электромагнитного сигнала являются важными задачами, которые необходимо решать при интерпретации данных георадиолокационного обследования железобетонных конструкций.

Теоретические основы отражения от арматуры импульсного сигнала георадара. Аналитическая модель

Для обеспечения требуемой точности при определении дальности до различного типа неоднородностей при зондировании геосред современные георадары используют максимально широкополосные импульсные сигналы. При формировании импульсов используется, в основном, “ударное возбуждение” антенны перепадом напряжения. Аналитически импульсный сигнал, излучаемый георадаром, можно задать в виде [14]:

$S_{изл}(t) = e^{-\frac{\pi(t-kT)^2}{\tau^2}} \cdot e^{i\omega(t-kT)}$, где T – период колебаний, τ – постоянная времени определяемая выходными параметрами генератора, k – волновое число.

Рассмотрим аналитическое описание и форму зондирующего электромагнитного сигнала, отраженного от металлической арматуры, расположенной в железобетонной обделке горной выработки с диэлектрической проницаемостью $\epsilon' \approx 3 \div 6,5$, тангенсом угла потерь $tg\delta \approx 0,15$. Электромагнитные свойства бетона были приняты как в работе [15]. Диаметры арматуры равны 10 мм, 16 мм и 25 мм, а ее длина много больше длинны излучаемой волны λ , материал – сталь.

В таком случае форму сигнала, отраженного от проводящей поверхности арматуры и наведенного в приемнике, можно описать функцией [16]:

$$S_{отп}(t) = \frac{V_{\perp} \cdot S_{цил} \cdot e^{-\frac{\pi(t-kT-\tau')^2}{\tau^2}} \cdot e^{i[\omega(t-kT-\tau')-\phi]} \cdot e^{-2k_{\delta}R}}{R^2}, \text{ где } S_{цил} - \text{эффективная отражающая площадь металлического цилиндра(арматуры) при нормальном падении на него электромагнитной волны рассчитывается по формуле:}$$

$S_{цил} = \pi \frac{d}{2} e^{2dk_{\delta}}$, d – диаметр цилиндра; τ' – постоянная времени, определяемая временем прохождения сигнала в бетоне расстояния от передающей антенны до арматуры и обратно [16]: $\tau' = \frac{2 \cdot R \cdot \cos\psi}{v}$, где ψ – угол, определяющий разнесение между передающей и приемной антеннами; v – скорость распространения электромагнитной волны в среде: $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'}}$ (c – скорость распространения электромагнитных волн в воздухе $3 \cdot 10^8$ м/с), k_{δ} – волновое число для материала бетон, R –

глубина залегания арматуры. Коэффициент отражения (V_{\perp}) от проводящей поверхности арматуры можно принять равным +1, а фаза отраженного сигнала (ϕ) по отношению к излучаемому изменяется на 180° [17]. Были выполнены аналитические расчеты отраженного зондирующего импульса от металлической арматуры при нормальном падении на нее электромагнитной волны, излучаемой георадаром. Принято, что на глубине до 350 мм бетон однороден. Для упрощения расчетов фронт излучаемой волны принят плоским, а электрическая проводимость и диэлектрическая проницаемость не зависят от частоты. Сигнал $S(t)$ есть суперпозиция излучаемого (1) и отраженного (2) сигналов для импульса длительностью 1 нс. Были выполнены расчеты по влиянию электромагнитных свойств бетона, размеров и глубины залегания в нем металлической арматуры на параметры отраженного сигнала (см. рис. 1-3)

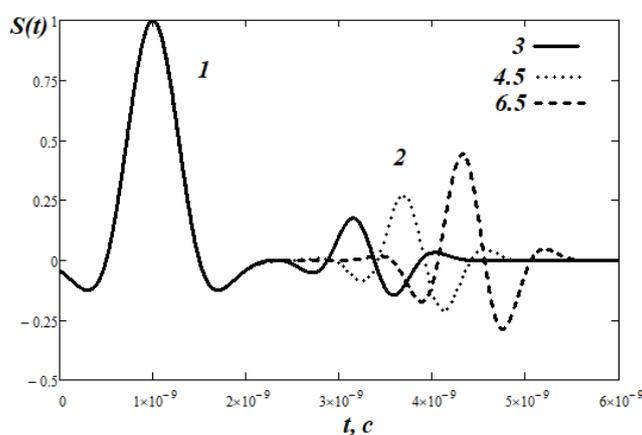


Рис. 1. Формы отражения импульсного сигнала георадара от границы раздела сред «бетон –металлическая арматура» для расстояния $R = 200$ мм и диаметра арматуры 25 мм с учетом вариации диэлектрической проницаемости бетона: 1 – излучаемый и 2 – отраженные импульсы

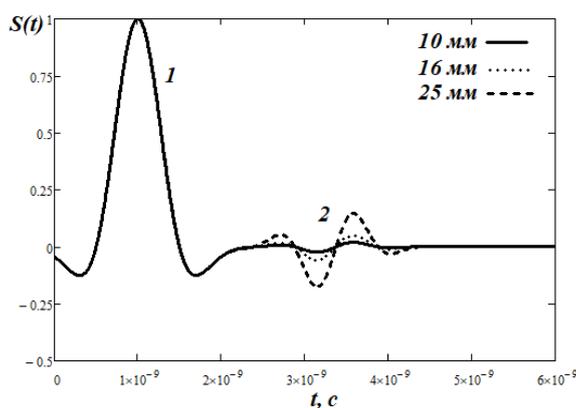


Рис. 2. Формы отражения импульсного сигнала георадара от границы раздела сред «бетон – металлическая арматура» для $\epsilon' \approx 6,5$, $tg\delta \approx 0,15$, расстояния $R = 200$ мм с учетом вариации диаметра арматуры: 1 – излучаемый и 2 – отраженные импульсы

Увеличение диэлектрической проницаемости среды приводит увеличению задержки сигнала по времени. Зная скорость распространения электромагнитного сигнала в бетоне по времени его задержки, можно рассчитать дальность до проводящего объекта (арматуры).

С увеличением диаметра арматуры увеличивается амплитуда отраженного сигнала (2), при этом время задержки остается неизменным.

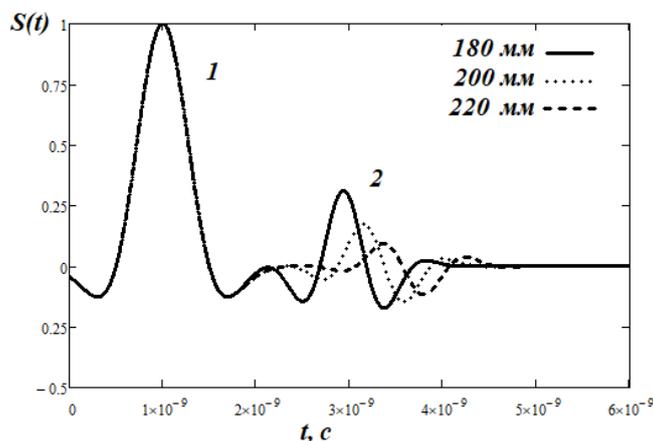


Рис. 3. Формы отражения импульсного сигнала георадара от границы раздела сред «бетон – металлическая арматура» для $\epsilon' \approx 6,5$, $tg\delta \approx 0,15$ с учетом вариации глубины залегания арматуры (R , мм) диаметром 25 мм:
1 – излучаемый и 2 – отраженные импульсы

С увеличением расстояния R до арматуры увеличивается время прохождения сигнала в бетоне и уменьшается его амплитуда.

С помощью полученных аналитических расчётов можно оценивать влияние электромагнитных свойств железобетонной обделки горной выработки, размеров арматуры и глубины ее залегания на параметры отраженного сигнала. Но данная модель не учитывает частотную дисперсию диэлектрической проницаемости бетона. Если сухой бетон можно принять практически идеальным диэлектриком, то в реальных условиях горной выработки, наличие повышенной влажности будет существенно влиять на диэлектрическую проницаемость и рассматривать ее будет возможно только с учетом ее комплексного характера. Для этого была разработана численная модель, основанная на использовании программного обеспечения grMax.

Численная модель на основе FDTD метода в программной среде grMax, интерпретация данных

Для выполнения моделирования используется метод конечных разностей во временной области (FDTD, Finite-Difference Time-Domain) (базовый алгоритм метода был предложен Кэйном Йи (Kane Yee)), в честь которого ячейки, на которые разбивается модель, названы ячейки Йи (Yee) [18, 19]. Численное решение

получается во временной области путем решения уравнений Максвелла для каждой ячейки (см. Рис. 4). Этот вид ячеек используется для дискретизации как непрерывного пространства, так и времени, а распространение электромагнитных волн в среде соответствует закону Максвелла.

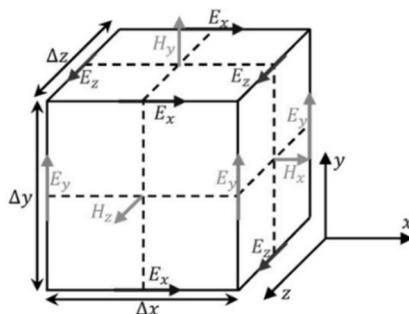


Рис. 4. Yee сетка алгоритма FDTD, E и H являются компонентами электрического поля и магнитного поля соответственно

GprMax – это свободно доступный набор инструментов для моделирования электромагнитных волн, основанный на численном методе конечных разностей во временной области (FDTD). На сегодняшний день gprMax позволяет осуществлять моделирование сложных многослойных геосред, в том числе и дисперсионных на основе выражений Дебая, Друде или Лоренца [20].

За основу при построении численной модели взаимодействия георадара с железобетонной обделкой горной выработки была принята модель металлического цилиндра в диэлектрической среде [21]. Передающая антенна T (рис. 5) георадара излучает электромагнитный импульс, часть энергии которого непосредственно достигает приемной антенны R в виде прямой волны (DW — direct wave), а часть распространяется в бетоне и отражается от поверхности проводящего объекта (арматуры заданного диаметра), достигает приемной антенны в виде отраженной волны (RW — reflected wave). В качестве зондирующего импульса используется форма волны Риккерас центральной частотой 1 ГГц и условной амплитудой 1: `#waveform: ricker 1 1e9 my_ricker`

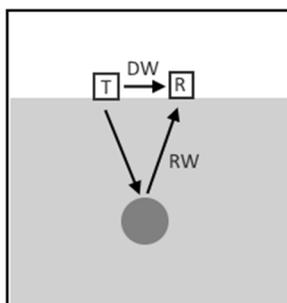


Рис. 5. Взаимодействие георадара с бетонным блоком, содержащим арматуру

В таб. 1 приведены параметры модели, которые остаются постоянными, и те, которые варьируются для каждой модели. Для двумерной модели толщина z принимается одному шагу дискретизации. Ось поляризации передающей антенны георадара, в качестве которой используется диполь, принята ось z , так как только эта ось допустима для построения двумерной модели (2D TMz-режим). В связи с этим, в двумерном случае (2D TMz-режим) рассчитываются только E_z -компонента электрического поля и компоненты H_x и H_y магнитного поля. Каждая представленная в открывшемся окне трасса (A-scan) отображает временной график одной из составляющих электромагнитного поля в точке расположения приемной антенны. На трассах A-scan будут отображены прямая волна, пришедшая напрямую от передающей антенны (DW), и отраженная от арматуры волна (RW).

Таблица 1

Постоянные и переменные параметры модели

Наименование параметра	Значение
Постоянные параметры модели	
Размеры моделируемой области (x, y, z)	800 мм, 600 мм, 2 мм
Размеры бетонного блока, принятые для моделирования (x, y, z)	800 мм, 350 мм, 2 мм
Шаг дискретизации (Δx , Δy , Δz)	2 мм, 2 мм, 2 мм
Время моделирования	8 нс
Положение передающей антенны (x, y, z)	350 мм, 350 мм, 0 мм
Положение приемной антенны (x, y, z)	450 мм, 350 мм, 0 мм
Переменные параметры модели	
Диаметры арматуры, мм	10; 16; 25
Глубина залегания арматуры, мм	180; 200; 220
Диэлектрическая проницаемость бетона	3; 4,5; 6,5
Проводимость бетона, См/м	0,01; 0,02; 0,03

Материал бетон задается функцией `#material: 3.0 0.01 1 0 beton`, где $\epsilon=3.0$ – диэлектрическая проницаемость бетона (не зависит от частоты), $\sigma=0.01$ См/м – проводимость бетона, $\mu=1$ – магнитная проницаемость и $\sigma^*=0$ – магнитные потери. На частоте ω комплексная диэлектрическая проницаемость вещества с ориентационной поляризацией $\tilde{\epsilon}(\omega)$, имеющая единственное время релаксации τ определяется формулой Дебая [20]: $\tilde{\epsilon}(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 + i\omega\tau}$, где ϵ_∞ – значение диэлектрической проницаемости на бесконечно большой частоте, ϵ_0 – значение диэлектрической проницаемости на частоте $\omega \rightarrow 0$. Функция `#add_dispersion_debye` используется для добавления свойств дисперсии по Дебаю к уже определенным

в `#material` функциям. Например, для бетона зададим: `#add_dispersion_debye: 1 7 15e-12 beton`, где 1 – число полюсов Дебая, 7 – это разница между относительной диэлектрической проницаемостью нулевой частоты и относительной диэлектрической проницаемостью на бесконечной частоте для бетона, $15e-12$ – это время релаксации (секунды) для первого полюса Дебая.

Ниже на рис. 6-9 представлены результаты численного моделирования (A-scan) отраженного от арматуры сигнала георадара с учетом вариации диэлектрической проницаемости и проводимости бетона, глубины залегания и диаметра арматуры.

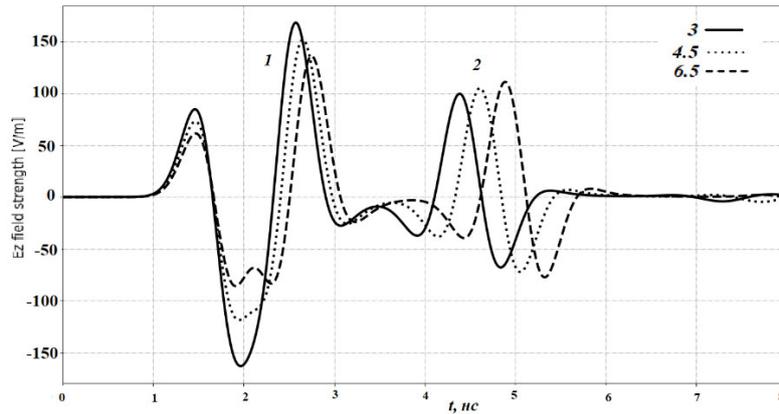


Рис. 6. Формы отражения сигнала георадара от границы раздела сред «бетон – металлическая арматура» для расстояния $R = 200$ мм и диаметра арматуры 25 мм с учетом вариации диэлектрической проницаемости бетона: 1 – излучаемый и 2 – отраженные импульсы

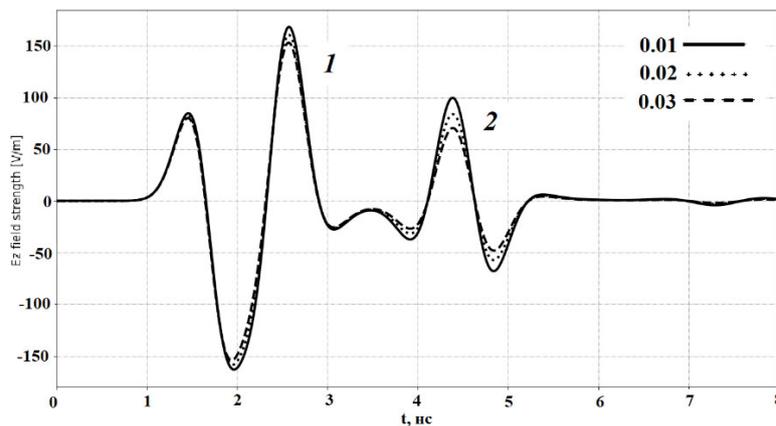


Рис. 7. Формы отражения сигнала георадара от границы раздела сред «бетон – металлическая арматура» для расстояния $R = 200$ мм и диаметра арматуры 25 мм с учетом вариации электропроводности бетона: 1 – излучаемый и 2 – отраженные импульсы

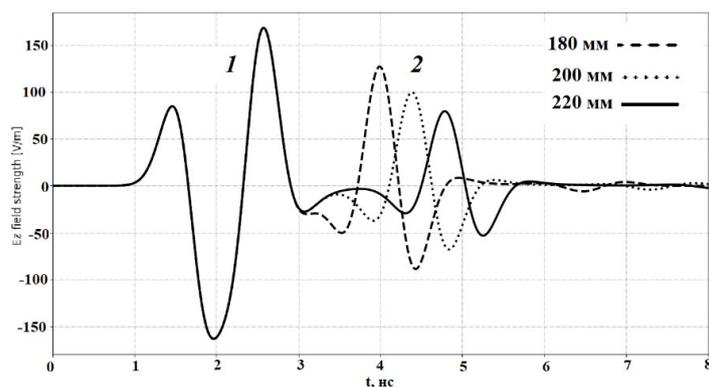


Рис. 8. Формы отражения сигнала георадара от границы раздела сред «бетон – металлическая арматура» для $\epsilon=3$, $\sigma=0,01$ и диаметра арматуры 25 мм с учетом вариации глубины залегания арматуры: 1 – излучаемый и 2 – отраженные импульсы

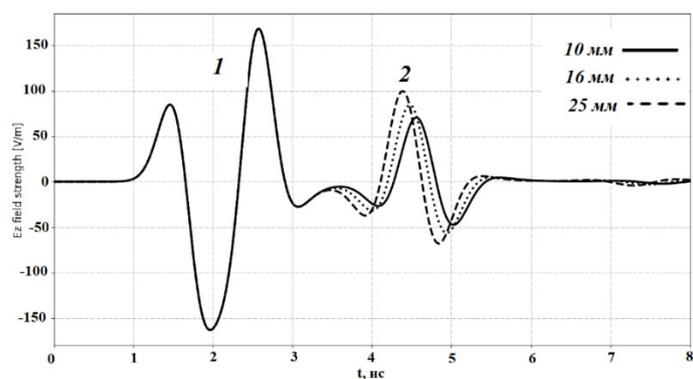


Рис. 9. Формы отражения сигнала георадара от границы раздела сред «бетон – металлическая арматура» для $\epsilon=3$, $\sigma=0,01$ и для расстояния $R = 200$ мм с учетом вариации диаметра арматуры: 1 – излучаемый и 2 – отраженные импульсы

С помощью численного моделирования в программной среде GprMax, аналогично аналитическим расчетам было установлено, что более высокая относительная диэлектрическая проницаемость бетона увеличивает время прохождения в нем электромагнитной волны. Увеличение глубины залегания арматуры приводит к уменьшению амплитуды отраженного сигнала и предполагает его более длительное время прохождения. А повышение проводимости бетона и увеличение диаметра арматуры в основном влияет на амплитуды отраженного сигнала, а не на скорость распространения волны.

Заключение

Отличие между результатами аналитических и численных расчетов может быть обосновано тем, что аналитические расчеты не учитывают дисперсию среды (бетона) при расчетах в выбранном частотном диапазоне.

Полученные результаты позволят в будущем за счет использования процесса генерации обучающих данных с помощью программного комплекса GprMax автоматизировать обработку георадиолокационных данных и повысить точность определения толщины и диэлектрической проницаемости бетонной отделки горной выработки, а также наличия в ней неоднородностей различного типа (арматура, пустоты, зоны обводнения и т.п.).

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ, номер государственной регистрации 121052500138-4.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Saeidi T., Alhawari A.R.H., Alkawani A.H.M., Alsuwian T., Imran M.A., Abbasi Q. High gain compact UWB antenna for ground penetrating radar detection and soil inspection. *Sensors* 2022, 22, 5183.
2. Birhane F.N., Choi Y.T., Lee S.J. Development of condition assessment index of ballast track using ground-penetrating radar(gpr). *Sensors* 2021, 21, 6875.
3. Karsznia K.R., Onyszko K., Borkowska S. Accuracy tests and precision assessment of localizing underground utilities using GPR detection. *Sensors* 2021, 21, 6765.
4. Colagrande S., Ranalli D., Tallini M. GPR research on damaged road pavements built in cut and fill sections. *Transp. Res. Proc.* 2020, 45, 30–37.
5. Bai H., Sinfield J.V. Improved background and clutter reduction for pipe detection under pavement using Ground Penetrating Radar (GPR). *J. Appl. Geophy*, 2020, 172, 103918.
6. Murín I., Neumann M., Brady C., Batora J., Capo M., Drozd D. Application of magnetometry, georadar (GPR) and geoelectrical methods in archaeo-geophysical investigation of a Napoleonic battlefield with fortification at Pressburg (Bratislava, Slovakia). *J. Appl. Geophy*, 2021, 196, 104493.
7. Ortega-Ramírez J., Bano M., Villa Alvarado L.A., Medellín M.D., Rivero-Chong R., Motolinía-Temol C.L. High-resolution 3-D GPR applied in the diagnostic of the detachment and cracks in pre-Hispanic mural paintings at “Templo Rojo”, Cacaxtla, Tlaxcala, Mexico. *J. Cult. Herit.* 2021, 50, 61–72.
8. Qin H., Zhang D., Tang Y., Wang Y. Automatic recognition of tunnel lining elements from GPR images using deep convolutional networks with data augmentation. *Autom. Constr.* 2021, 130, 103830.
9. Qin H., Tang Y., Wang Z., Xie X., Zhang D. Shield tunnel grouting layer estimation using sliding window probabilistic inversion of GPR data. *Tunn. Undergr. Space Technol*, 2021, 112, 103913.
10. Feng D., Wang X., Zhang B. Specific evaluation of tunnel lining multi-defects by all-refined GPR simulation method using hybrid algorithm of FETD and FDTD. *Constr Build Mater*, 2018, 185, 220–229.
11. McCann D.M., Forde M.C. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. *NDT E Int*, 2001, 34, 71–84.
12. Shaw M.R., Millard S.G., Molyneaux T.C.K., Taylor M.J., Bungey J.H. Location of steel reinforcement in concrete using ground penetrating radar and neural networks. *NDT E Int*, 2004, 38, 203–212.
13. Gokhan K., Levent E. Neural network based inspection of voids and karst conduits in hydro-electric power station tunnels using GPR. *J. Appl. Geophy*, 2018, 151, 194–204.
14. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / под. ред. А. Гринева. – М.: Радиотехника, 2005. – 512 с.: ил.

15. Effects of building materials and structures on radiowave propagation above about 100 MHz. Recommendation ITU-R P. 2040-1. 2015, Доступно онлайн: [https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.2040-1-201507-S !!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.2040-1-201507-S!!PDF-E.pdf) (дата обращения 24 марта 2023 года).
16. Седлецкий Р.М. Эффективная площадь рассеивания идеально проводящих тел простейшей формы в средах с комплексной проницаемостью // Журнал радиоэлектроники. – 2001. – №9. – С. 17–25.
17. Долуханов, М.П. Распространение радиоволн: монография / М.П. Долуханов – М.: Гос. изд. литературы по вопросам связи и радио, 1960. – 392 с.
18. Брунов Б.Я. Теория электромагнитного поля / Брунов Б.Я., Гольденберг Л.М. – М.:Л.: Гос. элетротехн. Издат, 1956. –192 с.
19. Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. IEEE. Trans. Antennas. Propag. 1966, 14, 302–307.
20. Open source Finite-Difference Time-Domain: <https://www.gprmax.com> (дата обращения 24 марта 2023 года).
21. Akhaury U., Giannakis I., Warren C. (2021) Giannopoulos A. Machine Learning Based Forward Solver: An Automatic Framework in gprMax.

© А. П. Хмелинин, Е. В. Денисова, А. И. Конурич, Д. В. Орлов, 2023