



Научная статья

УДК 504.064.3

EDN: AWJAQN

DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-2-5

Исследование электромагнитных характеристик керамического материала на основе беложгущейся глины Корниловского месторождения с добавлением цветных металлов при различных концентрациях: анализ поглощения и отражения электромагнитного излучения

А.Н. Сигаев^а, А.Е. Федоров^б, Н.И. Чех^с, Д.Е. Куликов^{д✉}, А.С. Апкарян^е

^{а-е}Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, Российская Федерация

^еИнститут физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина СО РАН, Томск, Российская Федерация

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментального исследования электромагнитных характеристик керамического материала, полученного на основе беложгущейся глины Корниловского месторождения с добавлением цветных металлов (свинца и меди) в различных концентрациях. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки эффективных радиопоглощающих материалов для защиты от электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. Целью работы является установление зависимости коэффициентов отражения и поглощения электромагнитных волн от содержания металлической фазы в керамической матрице, а также определение оптимального состава материала для формирования радиопоглощающих покрытий. В качестве методов исследования использованы анализ S-параметров в диапазоне частот 0–18 ГГц и метод временной доменной рефлектометрии (TDR), позволяющий оценить уровень отраженного сигнала. Установлено, что введение свинца и меди существенно влияет на электрофизические свойства материала, изменяя его диэлектрическую проницаемость и электрическую проводимость. Показано, что при концентрации металлов 20 % наблюдается недостаточная степень поглощения электромагнитного излучения, тогда как при 40 % усиливается отражательная способность вследствие роста проводимости и поверхностных эффектов. Наиболее эффективные радиопоглощающие свойства достигаются при содержании металлической фазы около 30 %, что соответствует формированию оптимальной структуры материала, обеспечивающей баланс между диэлектрическими и проводящими потерями. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования разработанного керамического материала в качестве основы для радиопоглощающих покрытий, экранирующих конструкций и элементов защиты от электромагнитного воздействия.

Ключевые слова: беложгущаяся глина Корниловского месторождения, цветные металлы, радиопоглощающий материал, электромагнитное излучение, коэффициент поглощения, коэффициент отражения

Для цитирования: Сигаев А.Н., Федоров А.Е., Чех Н.И., Куликов Д.Е., Апкарян А.С. Исследование электромагнитных характеристик керамического материала на основе беложгущейся глины Корниловского месторождения с добавлением цветных металлов при различных концентрациях: анализ поглощения и отражения электромагнитного излучения // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № 2. С. ?–?. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-2-5>. EDN: AWJAQN.

Original article

Investigation of electromagnetic properties of ceramic material based on white-burning clay from Kornilovskoye deposit with non-ferrous metal additives at varying concentrations: analysis of electromagnetic radiation absorption and reflection

Aleksey N. Sigaev^а, Arthur E. Fedorov^б, Nikita I. Chekh^с,
Daniil E. Kulikov^{д✉}, Afanasiy S. Apkarian^е

^{а-е}Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, Tomsk, Russian Federation

^еPanin Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

Abstract. The paper reports the results of an experimental investigation into the electromagnetic properties of a ceramic material obtained from white-burning clay from the Kornilovskoye deposit with the addition of non-ferrous metals (lead and



copper) at varying concentrations. The relevance of the study is driven by the need to develop effective radar-absorbing materials for protection against electromagnetic radiation across a wide frequency range. The purpose of the study is to investigate the relationship between the reflection and absorption coefficients of electromagnetic waves and the metallic phase content within the ceramic matrix, as well as to identify the optimal composition of the material for radar-absorbing coatings formation. The study employs the following research methods: S-parameter analysis in the 0–18 GHz frequency range and time domain reflectometry (TDR), which allows for the estimation of the reflected signal level. It has been found that the addition of lead and copper significantly affects the electrophysical properties of the material, altering its dielectric permittivity and electrical conductivity. It has been shown that at the metal concentration of 20% an insufficient degree of electromagnetic radiation absorption is observed, whereas at 40%, the reflectivity increases due to the rise in conductivity and surface effects. The most effective radar absorption properties are achieved at the metallic phase content of approximately 30%, which corresponds to the formation of an optimal material structure that ensures a balance between dielectric and conductive losses. The obtained results indicate the promise of using the developed ceramic material as a basis for radar-absorbing coatings, shielding structures, and protective elements against electromagnetic exposure.

Keywords: white-burning clay from the Kornilovskoye deposit, non-ferrous metals, radar-absorbing material, electromagnetic radiation, absorption coefficient, reflection coefficient

For citation: Sigaev A.N., Fedorov A.E., Chekh N.I., Kulikov D.E., Apkarian A.S. Investigation of electromagnetic properties of ceramic material based on white-burning clay from Kornilovskoye deposit with non-ferrous metal additives at varying concentrations: analysis of electromagnetic radiation absorption and reflection. *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(2):?-?. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-2-5>. EDN: AWJAQN.

Введение

Керамические материалы на основе глинистого сырья активно применяются в радиоэкранных покрытиях, защитных конструкциях, системах снижения электромагнитного загрязнения и экранирующих композитах [1–6]. Введение в структуру керамики цветных металлов (свинца, меди) позволяет изменять ее диэлектрические характеристики, электрическую проводимость и, как следствие, способность к отражению и поглощению электромагнитных волн^{1,2} [7, 8].

Целью проведенного исследования являлось изучение зависимости коэффициентов отражения и поглощения электромагнитного излучения от концентрации цветных металлов (свинца и меди) в керамическом материале на основе беложгущейся глины Корниловского месторождения, а также определение оптимальной концентрации для формирования эффективного радиопоглощающего слоя.

Особое внимание в работе уделено принципам измерения электромагнитного излучения и интерпретации его взаимодействия с исследуемыми материалами. В рамках исследования рассматриваются физические основы регистрации отраженного и поглощенного сигналов, а также особенности применения методов фильтрации спектра (S-параметров) и временной доменной рефлектометрии (TDR, от англ.: Time Domain Reflectometry) для анализа свойств среды.

К задачам исследования можно отнести:

- разработку керамического материала на основе беложгущейся глины Корниловского месторождения с добавлением цветных металлов для защиты от электромагнитных волн;
- определение вариантов применения материала;
- исследование глинистых материалов Корниловского месторождения;
- изучение влияния электромагнитного излучения на человека;
- разработку состава шихты и температурного регламента при производстве материала для защиты от электромагнитных волн на основе беложгущейся глины и цветных металлов.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования применены по три образца глины Корниловского месторождения со свинцом и с медью. Пробы материалов обозначены как ОСВ-1, ОСВ-2, ОСВ-3, ОМ-1, ОМ-2 и ОМ-3. При исследовании использованы следующие методы:

- метод фильтрации спектра (S-параметров) – определение коэффициента поглощения материала в диапазоне частот 0–18 ГГц² [9, 10].
- метод временной доменной рефлектометрии (TDR) – регистрация отраженного сигнала для оценки коэффициента отражения [11].

¹ Неорганическая химия: учебник для студентов / под ред. Ю.Д. Третьякова. В 3 т. Т. 2: Химия переходных элементов. М.: Академия, 2011. 365 с.

² Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособие для вузов. В 10 т. Т. 8. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2005. 656 с.



Измерение характеристик электромагнитного излучения в работе основано на анализе взаимодействия падающей волны с границей раздела сред. Основными измеряемыми параметрами являются коэффициенты отражения R и передачи T , определяемые через S -параметры (S_{11} , S_{21}), регистрируемые с использованием векторного анализатора цепей.

Коэффициент отражения S_{11} характеризует долю энергии, отраженной от поверхности образца, и определяется как отношение амплитуды отраженной волны к падающей. Коэффициент передачи S_{21} отражает способность волны проходить через материал. На основе этих параметров рассчитываются коэффициенты поглощения, связанные с потерями энергии в объеме материала [12, 13].

Метод TDR основан на регистрации отклика среды на короткий импульс. Анализ формы и амплитуды отраженного сигнала позволяет определить распределение неоднородностей, а также оценить диэлектрические свойства материала. Временное разрешение метода обеспечивает возможность локализации областей с различными электрофизическими характеристиками.

Важным аспектом является учет затухания сигнала, многократных отражений и дисперсионных эффектов, что особенно существенно при исследовании композиционных материалов с включениями проводящих фаз.

Результаты исследования и их обсуждение

Основой шихты является беложгущаяся глина Корниловского месторождения. В нее вводились различные концентрации цветных металлов, %: свинец – 20, 30, 40; медь – 20, 30, 40. Для всех образцов была проведена одинаковая технология подготовки: смешивание, формование, сушка, обжиг при 1250 °C [14, 15].

Для исследования использовали результаты определения огнеупорности глинистого материала с добавлением цветных металлов с целью использования материала в условиях высоких температур (таблица). Обжиг проводился на электрической печи «Накал» (ЗАО «Накал – промышленные печи», Россия).

Исследования образцов свинца с концентрацией 20, 30, 40 % отражены на рис. 1–3.

Полученные экспериментальные данные рассматриваются не только с точки зрения свойств материала, но и как результат реализации измерительной методики, основанной на анализе параметров отражения и поглощения электромагнитного излучения. Особенно формы резонансных кривых и амплитуды TDR-сигналов позволяют оценить чувствительность методов к изменению структуры среды и концентрации проводящей фазы.

На графике фильтрации при содержании свинца 20 % наблюдаются сравнительно неглубокие резонансные провалы в диапазонах 9–11 и 15–16 ГГц, что соответствует умеренной степени поглощения. Графики TDR подтверждают это – амплитуда отраженного импульса повышенная, характерная для материалов с низким уровнем внутренних потерь [16].

Повышение концентрации свинца до 30 % приводит к максимальному углублению резонансных минимумов, расширению частотной зоны поглощения и снижению уровня отражения на TDR-диаграмме. Это свидетельствует о достижении оптимального баланса между проводимостью и диэлектрическими потерями [17].

При увеличении содержания свинца до 40 % интенсивность поглощения частично сохраняется, однако спектр становится менее равномерным, а количество отраженной энергии возрастает. Это связано с избыточной проводимостью и усилением поверхностного отражения [18].

Исследования образцов меди с концентрацией 20, 30, 40 % изображены на рис. 4–6.

Результаты определения огнеупорности глинистого материала с добавлением цветных металлов Results of refractoriness determination of the clay material with non-ferrous metal additives

Номер пробы	Наименование тяжелого металла	Содержание тяжелого металла, %	Показатель огнеупорности, °C	Классификация по огнеупорности
ОСВ-1	Свинец	20	1250	Тугоплавкая
ОСВ-2	Свинец	30	1250	Тугоплавкая
ОСВ-3	Свинец	40	1250	Тугоплавкая
ОМ-1	Медь	20	1250	Тугоплавкая
ОМ-2	Медь	30	1250	Тугоплавкая
ОМ-3	Медь	40	1250	Тугоплавкая

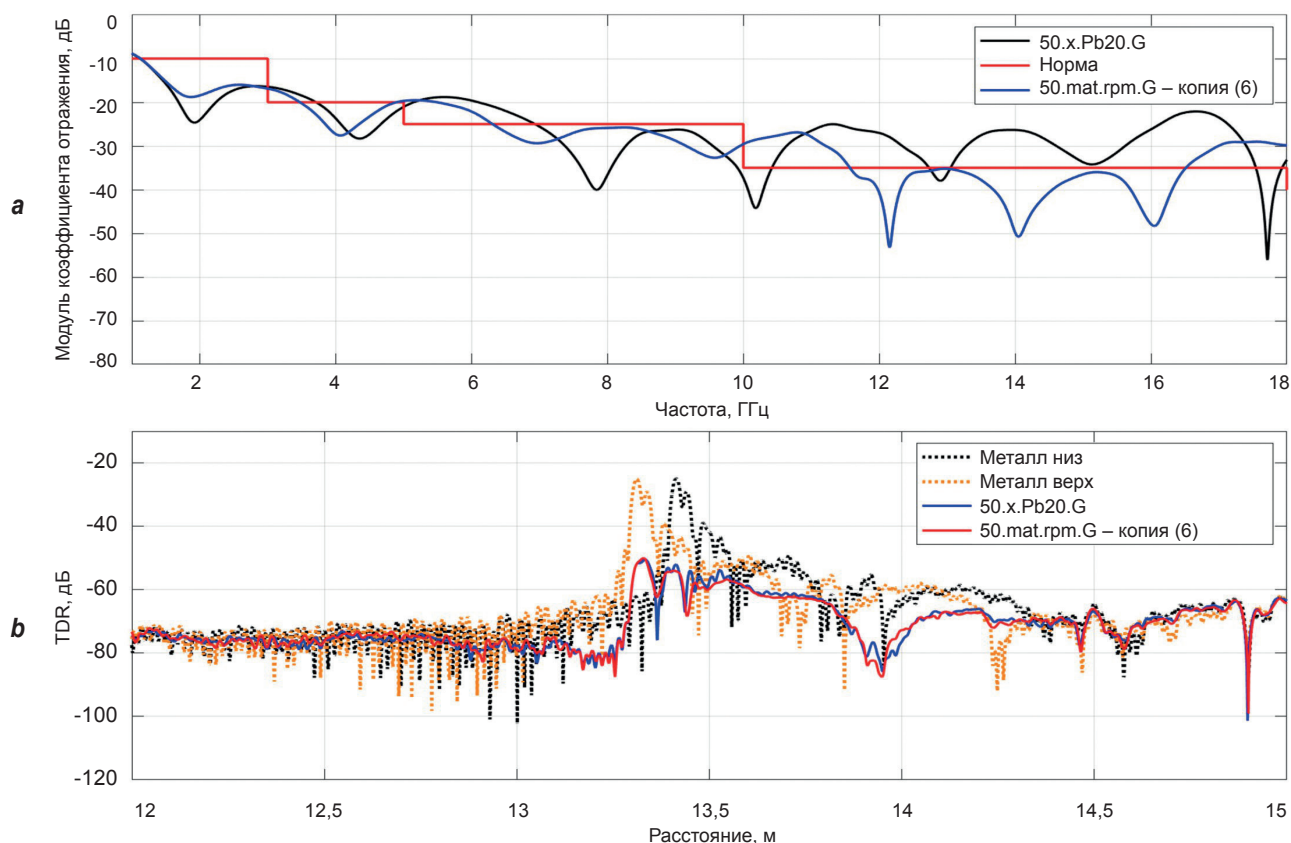


Рис. 1. Графики фильтрации (а) и временной доменной рефлектометрии (b) при концентрации свинца 20 %
Fig. 1. Filtration (a) and time domain reflectometry (b) graphs at the lead concentration of 20%

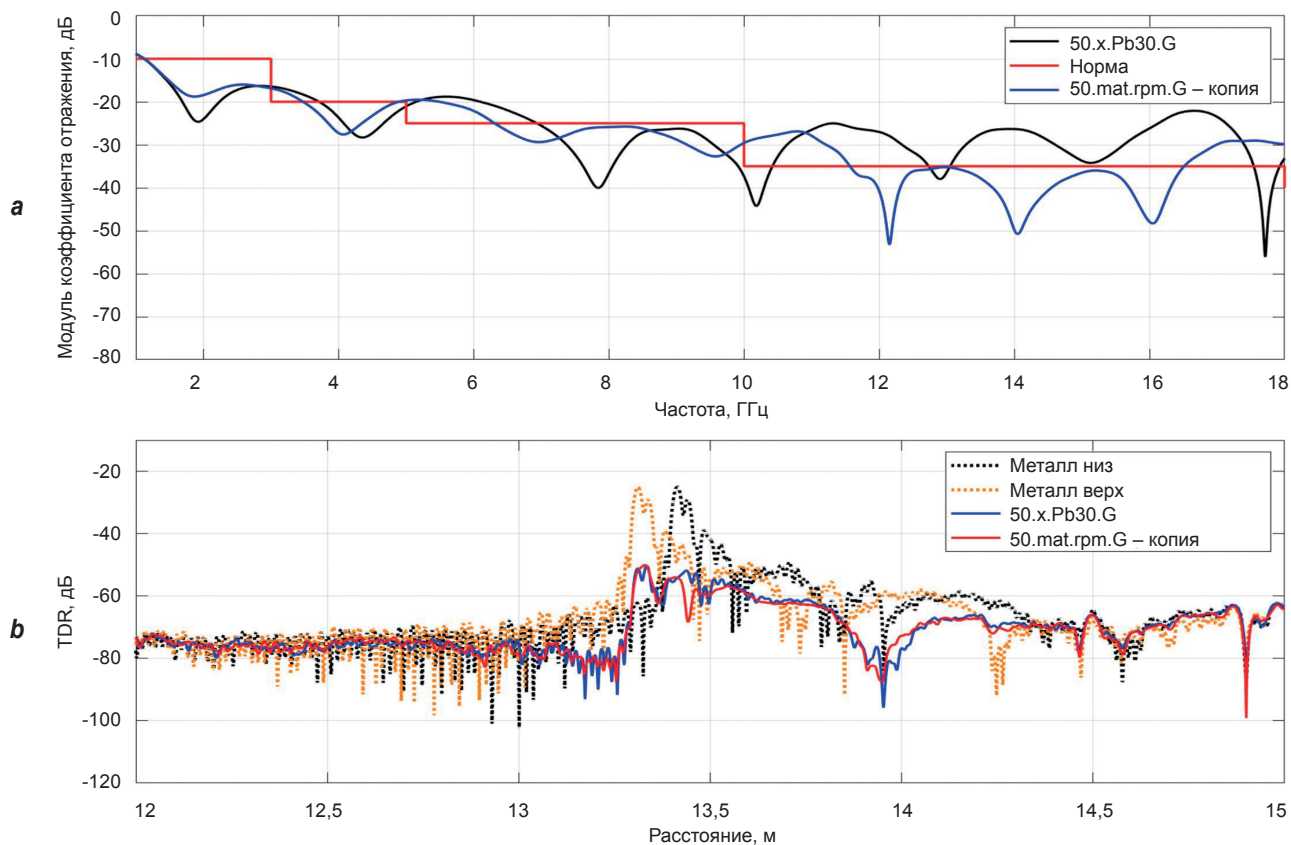


Рис. 2. Графики фильтрации (а) и временной доменной рефлектометрии (b) при концентрации свинца 30 %
Fig. 2. Filtration (a) and time domain reflectometry (b) graphs at the lead concentration of 30%

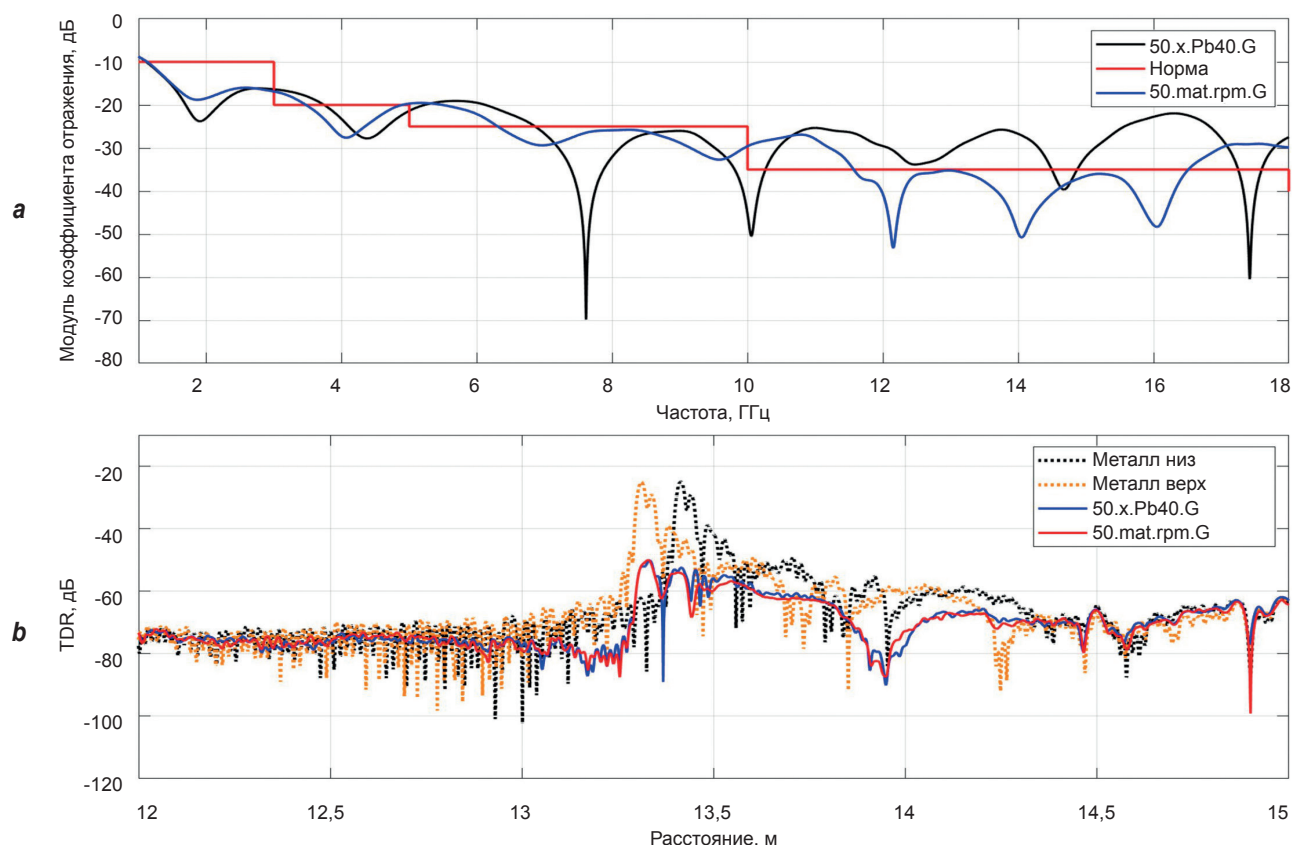


Рис. 3. Графики фильтрации (а) и временной доменной рефлектометрии (b) при концентрации свинца 40 %
Fig. 3. Filtration (a) and time domain reflectometry (b) graphs at the lead concentration of 40%

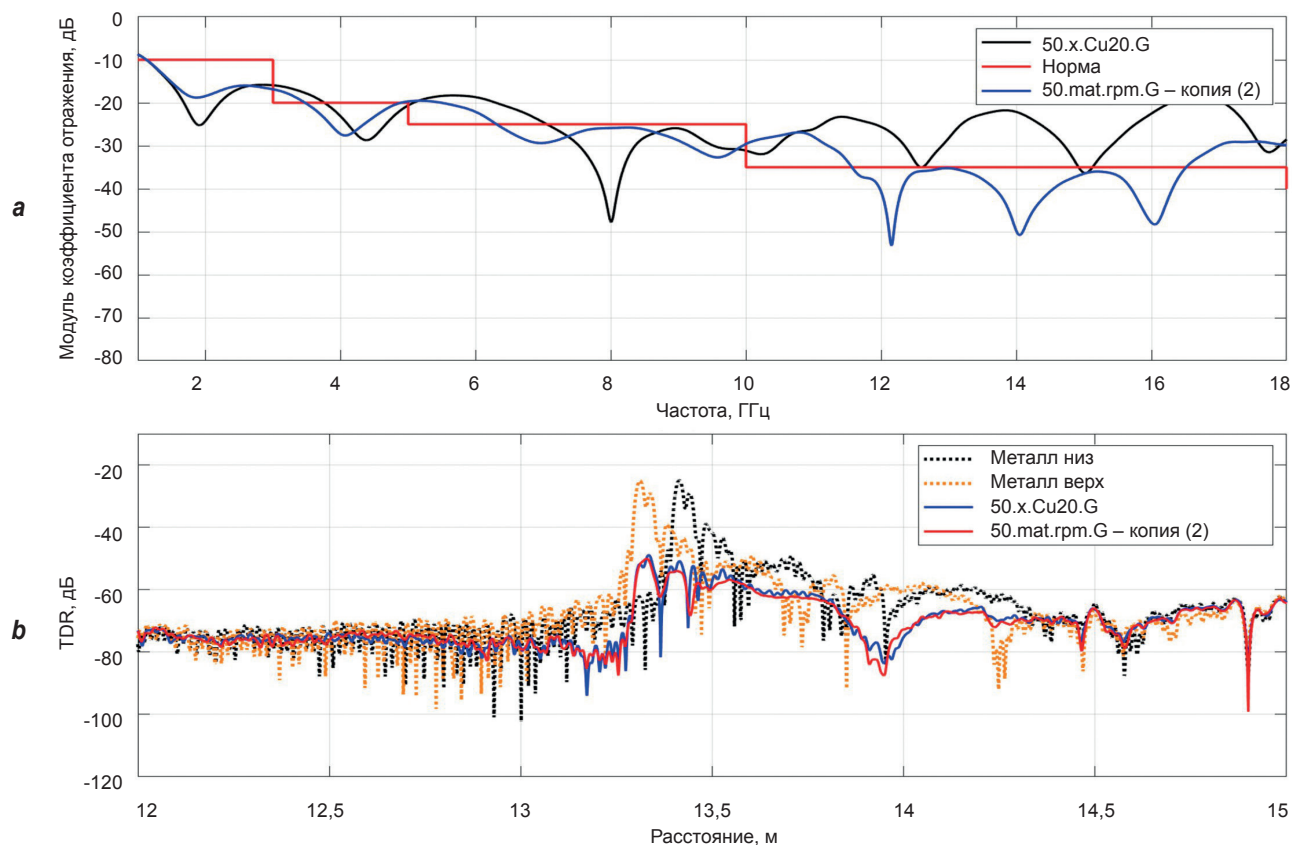


Рис. 4. Графики фильтрации (а) и временной доменной рефлектометрии (b) при концентрации меди 20 %
Fig. 4. Filtration (a) and time domain reflectometry (b) graphs at the copper concentration of 20%

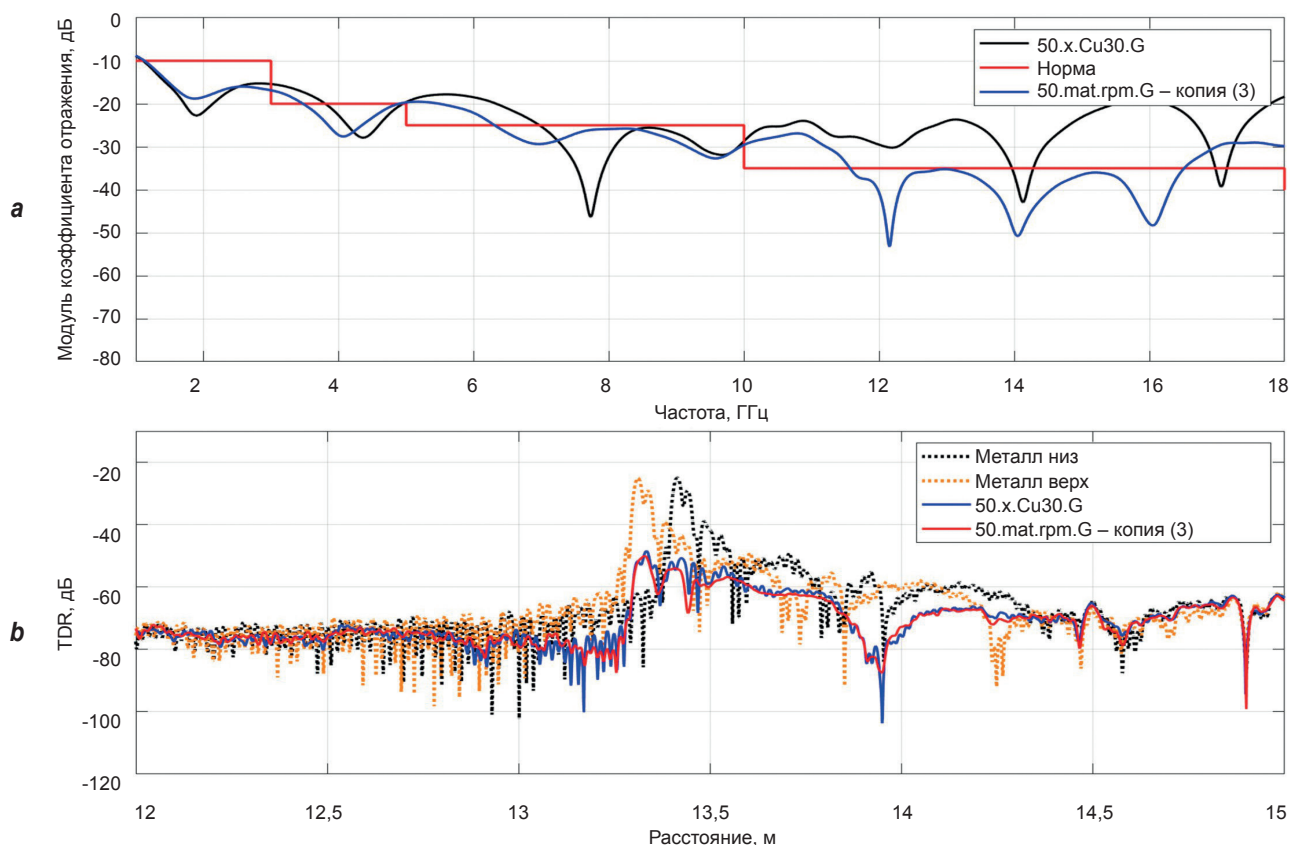


Рис. 5. Графики фильтрации (a) и временной доменной рефлектометрии (b) при концентрации меди 30 %
Fig. 5. Filtration (a) and time domain reflectometry (b) graphs at the copper concentration of 30%

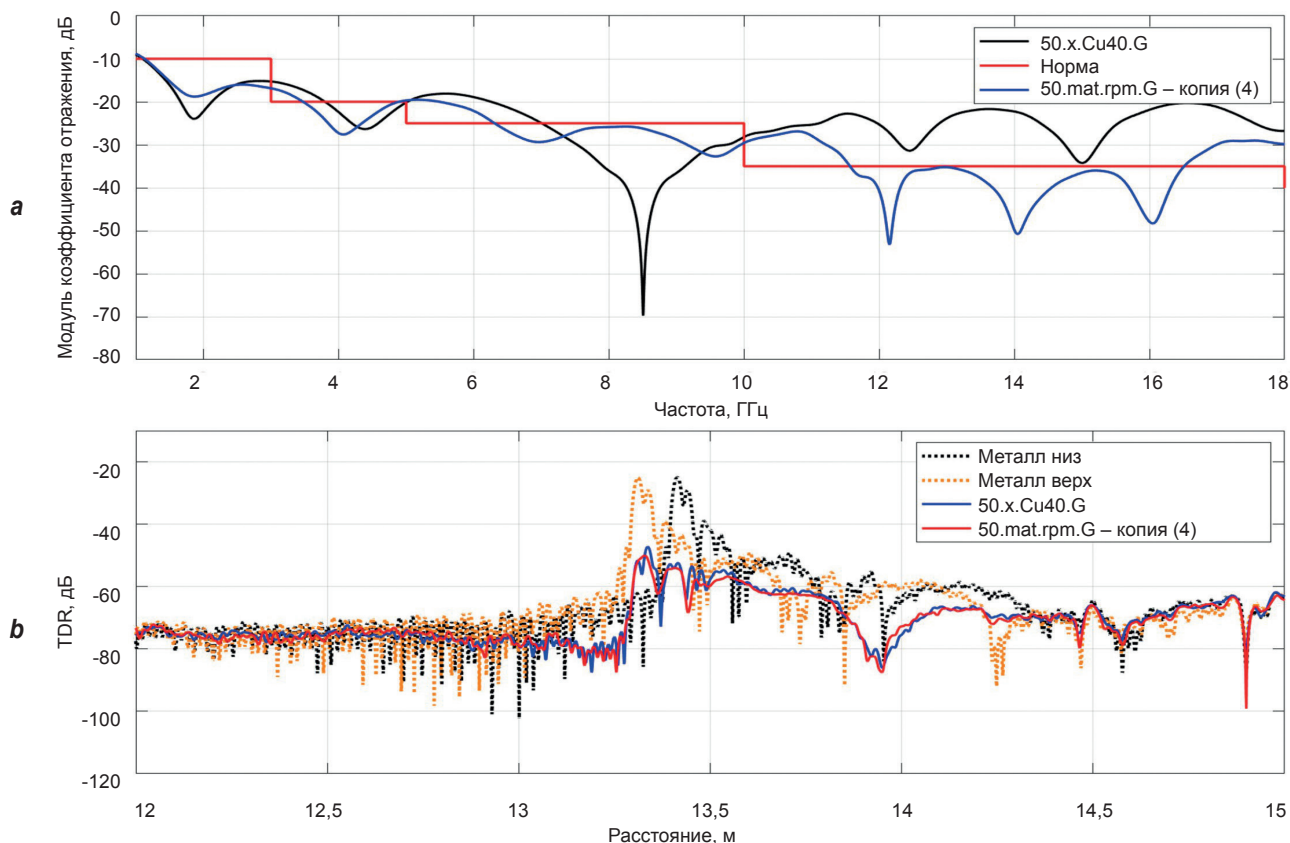


Рис. 6. Графики фильтрации (a) и временной доменной рефлектометрии (b) при концентрации меди 40 %
Fig. 6. Filtration (a) and time domain reflectometry (b) graphs at the copper concentration of 40%



При концентрации меди 20 % формируются лишь начальные резонансные признаки поглощения, а TDR-графики подтверждают высокую амплитуду отраженного сигнала, что указывает на слабое затухание электромагнитной волны в объеме материала [13, 14].

При концентрации меди 30 % регистрируется наиболее развитая полоса поглощения с глубокими резонансными впадинами и существенным уменьшением отражения.

При увеличении доли меди до 40 % спектры вновь становятся менее равномерными, глубина провалов снижается, а отраженный импульс усиливается. Этот эффект обусловлен ростом проводимости и уменьшением глубины проникновения волны, что приводит к увеличению поверхностного отражения [19].

Для свинца и меди наблюдается единая тенденция: наилучшие поглощающие свойства достигаются при концентрации 30 %, в то время как при 20 % материал недостаточно эффективен, а при 40 % начинает проявлять избыточную отражательную способность. Это подтверждает критическую роль перколяционного порога металлической фазы в форми-

ровании электромагнитных свойств керамических материалов [20].

Заключение

В работе продемонстрирована эффективность применения методов S-параметров и TDR для количественной оценки характеристик электромагнитного излучения при взаимодействии с композиционными материалами. Показано, что данные методы обладают высокой чувствительностью к изменению структуры среды и могут быть использованы в задачах геофизического мониторинга, дистанционного зондирования и диагностики материалов.

Исходя из результатов анализа следует отметить, что изделия, изготовленные на основе беложгущейся глины Корниловского месторождения с цветными металлами, являются перспективной основой для радиопоглощающих панелей и экранирующих элементов. Введение тяжелых металлов в глинистую матрицу значительно влияет на электромагнитные свойства материала. При концентрациях ниже 30 % материал обладает недостаточной поглощающей способностью, при концентрациях выше 30 % увеличивается отражение из-за избыточной проводимости.

Список источников

- Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
- Apkar'yan A.S., Sablina T.Yu. Physical and technical properties of clays from the Kornilovskoye deposit of the Tomsk Region // Russian Physics Journal. 2022. Vol. 65. Iss. 7. P. 1102–1108. <https://doi.org/10.1007/s11182-022-02737-8>. EDN: NOBBWO.
- Яковлева А.А., Немчинова Н.В. Перспективы использования глин локального проявления в металлургической практике // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 2. С. 415–425. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-415-425>. EDN: BEOUHU.
- Балинова Ю.А., Гращенков Д.В., Шавнев А.А., Бабашов В.Г., Чайникова А.С., Курбаткина Е.И. [и др.]. Высокотемпературные теплозащитные, керамические и металлокерамические композиционные материалы для авиационной техники нового поколения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 2. С. 83–92. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-2-83-92>. EDN: GLZNJC.
- Kuvaldin A.B., Lepeshkin A.R., Fedin M.A., Kuleshov A.O., Ilyinskaya O.I. Modeling the thermal state of parts with ceramic coatings in a high-frequency electromagnetic field // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021. Vol. 85. Iss. 12. P. 1507–1509. <https://doi.org/10.3103/S1062873821120212>. EDN: NCINPQ.
- Барабанова Е.В., Оспельников Н.М., Иванова А.И., Карпенков А.Ю. Влияние легирования акцепторными примесями на диэлектрические свойства керамики ниобата натрия // Физика твердого тела. 2025. Т. 67. № 4. С. 639–647. <https://doi.org/10.61011/FTT.2025.04.60545.342>. EDN: UZHGMY.
- Buzko V.Yu., Goryachko A.I., Ivanin S.N., Shutkin I.Yu. Development of a flexible thin-film radio-absorbing structure for UHF and SHF microwave range // Technical Physics. 2023. Vol. 68. Iss. 3. P. 365. <https://doi.org/10.21883/tp.2023.03.55811.185-22>. EDN: NIVSSW.
- Samukhina Yu.V., Glushko A.N., Buryak A.K. Comparative analysis of chromatograph mass spectrometric ways of detecting impurities in a concentrated hydrogen peroxide–rocket fuel oxidizer // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2025. Vol. 99. Iss. 2. P. 292–299. <https://doi.org/10.1134/S0036024424703321>. EDN: KYITZK.
- Астафьев П.А., Павелко А.А., Андришин К.П., Борзых А.Р., Рейзенкинд Я.А., Лерер А.М. [и др.]. Радиопоглощающие свойства сегнетопъезокерамических материалов // Письма в Журнал технической физики. 2024. Т. 50. № 16. С. 43–46. <https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.16.58538.19892>. EDN: ZVVD FS.
- Исаев И.М., Костишин В.Г., Коровушкин В.В., Салогуб Д.В., Шакирзянов Р.И., Тимофеев А.В., Миронович А.Ю. Магнитные и радиопоглощающие свойства поликристаллического феррита-шпинели $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$ // Журнал технической физики. 2021. Т. 91. № 9. С. 1376–1380. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.09.51217.74-21>. EDN: YRUUXT.



11. Певнева Н.А., Кондрашов Д.А., Гурский А.Л., Гусинский А.В. Определение S-параметров и диэлектрической проницаемости образцов кварцевой керамики в миллиметровом диапазоне длин волн // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2021. Т. 19. № 7. С. 65–71. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-7-65-71>. EDN: BJRIJF.
12. Тарасов С.П., Куценко А.Н., Белоус Ю.В. Коэффициент отражения как информативный параметр для экологических исследований // Известия Таганрогского государственного радиотехнического университета. 2002. № 6. С. 87–91. EDN: HVRGSP.
13. Krasniakova I.O., Sidorenko E.N., Galatova A.O., Rudsky D.I., Glazunova E.V., Kuprina Yu.A., et al. Features of the structure, microstructure, radio-emitting and radio-absorbing properties of mechanically and non-mechanically activated BiFeO₃ ceramics // Physics of the Solid State. 2023. Vol. 65. Iss. 4. P. 537. <https://doi.org/10.21883/pss.2023.04.55992.560>. EDN: OLHCZR.
14. Апкарян А.С., Куликов Д.Е. Исследование физико-технических свойств композиционного высокотемпературного теплоизоляционного материала на основе беложгущей глины Корниловского месторождения Томской области // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 2. С. 198–205. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2025-27-2-198-205>. EDN: SBLOAD.
15. Кийко В.М. Композиционная (BeO + TiO₂)-керамика для электронной и других областей техники // Новые огнеупоры. 2017. № 12. С. 64–70. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-12-64-70>.
16. Skirdin K.V., Dorozhkin K.V., Kazmina O.V. Magnetite's influence on the radio-absorbing properties of a porous glass composite at high-frequencies // Glass and Ceramics. 2022. Vol. 79. Iss. 5–6. P. 175–179. <https://doi.org/10.1007/s10717-022-00479-0>. EDN: RJECYS.
17. Samukhina Yu.V., Nikoladze G.M., Kulkova T.A., Buryak A.K. Radar-shielding and microwave-absorbing properties of composite materials based on shungite // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2023. Vol. 97. Iss. 2. P. 373–376. <https://doi.org/10.1134/s0036024423020231>. EDN: KNYNSR.
18. Terukov E.I., Babaev A.A., Zhilina D.V., Tkachev A.G. Radio-wave absorbing properties of polymer composites on the basis of shungite and carbon nanomaterial Taunit-M // Technical Physics. 2018. Vol. 63. Iss. 7. P. 1044–1048. <https://doi.org/10.1134/S1063784218070289>. EDN: VBQKAP.
19. Шакирзянов Р.И., Исаев И.М., Костишин В.Г., Каюмова А.Р., Олицкий В.К., Салогуб Д.В. Радиопоглощающие и радиозэранирующие характеристики феррит-полимерных композитов Mn-Zn феррит/П (ТФЭ-ВДФ) // Журнал технической физики. 2022. Т. 92. № 3. С. 462–471. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.03.52142.242-21>. EDN: ELEKQT.
20. Черкасов В.Д., Щербак Ю.П., Черкасов Д.В. Радиопоглощающие материалы на основе герметика «Абрис» // Строительные материалы и изделия. 2023. Т. 6. № 4. С. 30–41. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-4-30-41>. EDN: UCNHZA.

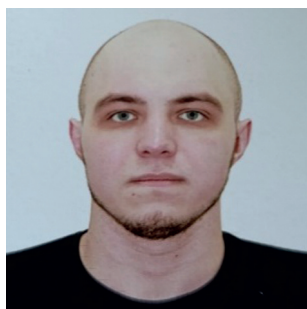
References

1. Osipov V.I., Sokolov V.N. *Clays and their properties. Composition, structure and property formation*. Moscow: GEOS; 2013, 576 p. (In Russ.).
2. Apkar'yan A.S., Sablina T.Yu. Physical and technical properties of clays from the Kornilovskoye deposit of the Tomsk Region. *Russian Physics Journal*. 2022;65(7):1102-1108. <https://doi.org/10.1007/s11182-022-02737-8>. EDN: HOBWBO.
3. Yakovleva A.A., Nemchinova N.V. Local clay prospects to be used in metallurgical practice. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(2):415-425. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-415-425>. EDN: BEOUHU.
4. Balinova Yu.A., Grashchenkov D.V., Shavnev A.A., Babashov V.G., Chainikova A.S., Kurbatkina E.I., Bolshakova A.N. High-temperature heat-shielding, ceramic and ceramic-metal composite materials for new-generation aviation equipment. *Vestnik Kontserna VKO "Almaz – Antey"*. 2020;(2):83-92. (In Russ.). <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-2-83-92>. EDN: GLZNJC.
5. Kuvaldin A.B., Lepeshkin A.R., Fedin M.A., Kuleshov A.O., Ilyinskaya O.I. Modeling the thermal state of parts with ceramic coatings in a high-frequency electromagnetic field. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2021;85(12):1507-1509. <https://doi.org/10.3103/S1062873821120212>. EDN: NCINPQ.
6. Barabanova E.V., Ospelnikov N.M., Ivanova A.I., Karpenkov A.Yu. Effect of acceptor doping on the dielectric properties of sodium niobate ceramics. *Fizika tverdogo tela*. 2025;67(4):639-647. (In Russ.). <https://doi.org/10.61011/FTT.2025.04.60545.342>. EDN: UZHGMY.
7. Buzko V.Yu., Goryachko A.I., Ivanin S.N., Shutkin I.Yu. Development of a flexible thin-film radio-absorbing structure for UHF and SHF microwave range. *Technical Physics*. 2023;68(3):365. <https://doi.org/10.21883/tp.2023.03.55811.185-22>. EDN: NIVSSW.
8. Samukhina Yu.V., Glushko A.N., Buryak A.K. Comparative analysis of chromatograph mass spectrometric ways of detecting impurities in a concentrated hydrogen peroxide–rocket fuel oxidizer. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2025;99(2):292-299. <https://doi.org/10.1134/S0036024424703321>. EDN: KYITZK.
9. Astafyev P.A., Pavelko A.A., Andryushin K.P., Borzykh A.R., Reisenkind Y.A., Lerer A.M., et al. Radio-absorbing properties of ferroelectric piezoceramic materials. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2024;50(16):43-46. (In Russ.). <https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.16.58538.19892>. EDN: ZVVDVS.
10. saev I.M., Kostishin V.G., Korovushkin V.V., Salogub D.V., Shakirzyanov R.I., Timofeev A.V., and Mironovich A.Yu. Magnetic and radar absorbing properties of polycrystalline spinel ferrite Li_{0,33}Fe_{2,29}Zn_{0,21}Mn_{0,17}O₄. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2021;91(9):1376-1380. (In Russ.). <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.09.51217.74-21>. EDN: YRUUXT.



11. Pevneva N.A., Kondrashov D.A., Gursky A.L., Gusinsky A.V. Estimation of S-parameters and dielectric permittivity of quartz ceramics samples in millimeter waveband. *Doklady BGUIR*. 2021;19(7):65-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-7-65-71>. EDN: BJRIJF.
12. Tarasov S.P., Kutsenko A.N., Belous Yu.V. Reflection coefficient as an informative parameter for environmental studies. *Izvestiya Taganrogskego gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2002;6:87-91. (In Russ.). EDN: HVRGSP.
13. Krasniakova I.O., Sidorenko E.N., Galatova A.O., Rudsky D.I., Glazunova E.V., Kuprina Yu.A., et al. Features of the structure, microstructure, radio-emitting and radio-absorbing properties of mechanically and non-mechanically activated BiFeO₃ ceramics. *Physics of the Solid State*. 2023;65(4):537. <https://doi.org/10.21883/pss.2023.04.55992.560>. EDN: OLHCZR.
14. Apkarian A.S., Kulikov D.E. Physical and technical properties of composite high-temperature thermal insulation material based on white-burning clay from Kornilovsky deposit in the Tomsk Region. *Journal of Construction and Architecture*. 2025;27(2):198-205. (In Russ.). <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2025-27-2-198-205>. EDN: SBLOAD.
15. Kijko V.S., Pavlov A.V. The composite BeO + TiO₂-ceramics for the electronic engineering and other technical applications. *New Refractories*. 2017;12:64-70. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-12-64-70>.
16. Skirdin K.V., Dorozhkin K.V., Kazmina O.V. Magnetite's influence on the radio-absorbing properties of a porous glass composite at high-frequencies. *Glass and Ceramics*. 2022;79(5-6):175-179. <https://doi.org/10.1007/s10717-022-00479-0>. EDN: RJECSY.
17. Samukhina Yu.V., Nikoladze G.M., Kulkova T.A., Buryak A.K. Radar-shielding and microwave-absorbing properties of composite materials based on shungite. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2023;97(2):373-376. <https://doi.org/10.1134/s0036024423020231>. EDN: KNYNSR.
18. Terukov E.I., Babaev A.A., Zhilina D.V., Tkachev A.G. Radio-wave absorbing properties of polymer composites on the basis of shungite and carbon nanomaterial Taunit-M. *Technical Physics*. 2018;63(7):1044-1048. <https://doi.org/10.1134/S1063784218070289>. EDN: VBQKAP.
19. Shakirzyanov R.I., Isaev I.M., Kostishin V.G., Kayumova A.R., Olitsky V.K., Salogub D.V. Radar absorbing and shielding characteristics in ferrite-polymer composites Mn-Zn ferrite/P (TFE-VDF). *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2022;92(3):462-471. (In Russ.). <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.03.52142.242-21>. EDN: ELEKQT.
20. Cherkasov V.D., Shcherbak Yu.P., Cherkasov D.V. Radar absorbing materials based on sealant "Abris". *Construction Materials and Products*. 2023;6(4):30-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-4-30-41>. EDN: UCNHZA.

Информация об авторах / Information about the authors



Сигаев Алексей Николаевич,

студент,
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
г. Томск, Российская Федерация,
lexa.s.05@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-3163-7046>

Aleksey N. Sigaev,

Student,
Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,
Tomsk, Russian Federation,
lexa.s.05@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-3163-7046>

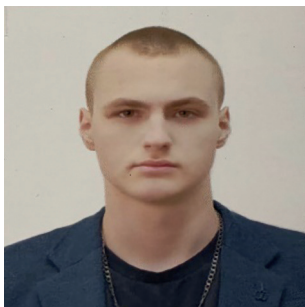


Федоров Артур Евгеньевич,

студент,
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
г. Томск, Российская Федерация,
arturfeodoroff@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0008-8433-4564>

Arthur E. Fedorov,

Student,
Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,
Tomsk, Russian Federation,
arturfeodoroff@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0008-8433-4564>

**Чех Никита Иванович,**

студент,
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
г. Томск, Российская Федерация,
wbquit@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-2926-2496>

Nikita I. Chekh,

Student,
Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,
Tomsk, Russian Federation,
wbquit@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-2926-2496>

**Куликов Даниил Евгеньевич,**

аспирант,
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
г. Томск, Российская Федерация,
✉ daniil1870@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-4524-495X>

Daniil E. Kulikov,

Postgraduate Student,
Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,
Tomsk, Russian Federation,
✉ daniil1870@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-4524-495X>

**Апкарьян Афанасий Саакович,**

доктор технических наук,
профессор кафедры радиоэлектронных технологий
и экологического мониторинга,
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
г. Томск, Российская Федерация,
руководитель Научно-образовательного центра
Томского государственного университета
при Институте физики прочности и материаловедения СО РАН,
Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина СО РАН,
г. Томск, Российская Федерация,
asa490@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0000-9107-5232>**Afanasy S. Apkarian,**

Dr. Sci. (Eng.),
Professor of the Department of Radioelectronic Technologies
and Environmental Monitoring,
Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,
Tomsk, Russian Federation,
Head of the Research and Education Center
of Tomsk State University at the Institute of Strength Physics
and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Panin Institute of Strength Physics and Materials Science,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Tomsk, Russian Federation,
asa490@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-9107-5232>

Вклад авторов / Contribution of the authors

А.Н. Сигаев – написание черновика рукописи.
А.Е. Федоров – проведение исследования.
Н.И. Чех – проведение исследования.
Д.Е. Куликов – формальный анализ, редактирование рукописи.
А.С. Апкарьян – разработка концепции, научное руководство.



Aleksey N. Sigaev – writing – original draft.
Arthur E. Fedorov – investigation.
Nikita I. Chekh – investigation.
Daniil E. Kulikov – formal analysis, writing – editing.
Afanasiy S. Apkarian – conceptualization, supervision.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 22.05.2026; одобрена после рецензирования 04.06.2026; принята к публикации 15.06.2026.

The article was submitted 22.05.2026; approved after reviewing 04.06.2026; accepted for publication 15.06.2026.