

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКРАНИРУЮЩИХ И ПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ШУНГИТОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

© 2025 г. Ю. В. Самухина<sup>a, \*</sup>, А. К. Буряк<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН), 119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 31, корп. 4, Россия

\*e-mail: juliesam2008@mail.ru

Поступила в редакцию 05.06.2024 г.

После доработки 05.06.2024 г.

Принята к публикации 20.06.2024 г.

Исследован мелкодисперсный шунгит в качестве эффективного наполнителя композиционных материалов. Получены экспериментальные данные о влиянии концентрации наполнителя композиционного материала на его поглощающие и экранирующие электромагнитное излучение характеристики в радио- и СВЧ-диапазоне. Полученные данные могут быть использованы для изготовления эффективных радиопоглощающих материалов и электромагнитных экранов для защиты от нежелательного воздействия электромагнитного излучения, защиты информации, в радиотехнике, а также в военном деле.

*Ключевые слова:* шунгит, экраны электромагнитного излучения, радиопоглощающие покрытия, композиционные материалы

DOI: 10.31857/S0044453725020167, EDN: DDDCBP

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение технических средств, использующих электромагнитные волны, особенно в области радио- и сверхвысоких частот, приводит к росту их интенсивности и негативному воздействию на биологические объекты. Ведется широкий поиск различных материалов для устранения этого влияния [1]. Но каждый из исследуемых материалов обладает как положительными, так и отрицательными свойствами, которые затрудняют его использование на практике [2]. В то же время существует целый класс природных материалов, содержащих углеродные компоненты, обладающих мультиспектральным поглощением и экранированием электромагнитного излучения (ЭМИ). Одним из перспективных природных материалов является шунгит Зажогинского месторождения в Карелии.

Актуальной задачей на данный момент является создание экранов ЭМИ на основе нанодисперсных наполнителей, обладающих особыми свойствами, обеспечивающими возможность управления характеристиками экранирования и поглощения ЭМИ.

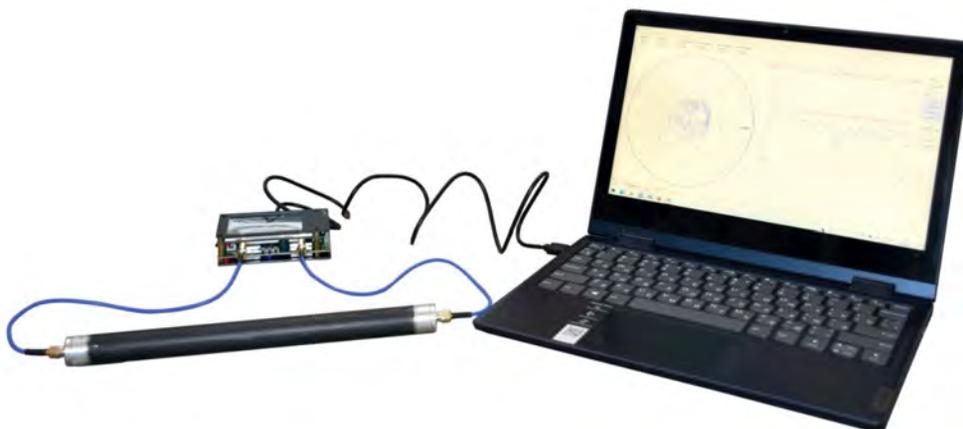
Шунгитовые породы представляют собой природные микрогетерогенные композиты

с различными наноструктурированными формами углерода. Благодаря высокому содержанию электропроводящей углеродной фазы [3–4] шунгитовые материалы в виде мелких частиц или микропорошков могут быть использованы в качестве наполнителя для производства радиопоглощающих и радиоэкранирующих композиционных материалов [3–7].

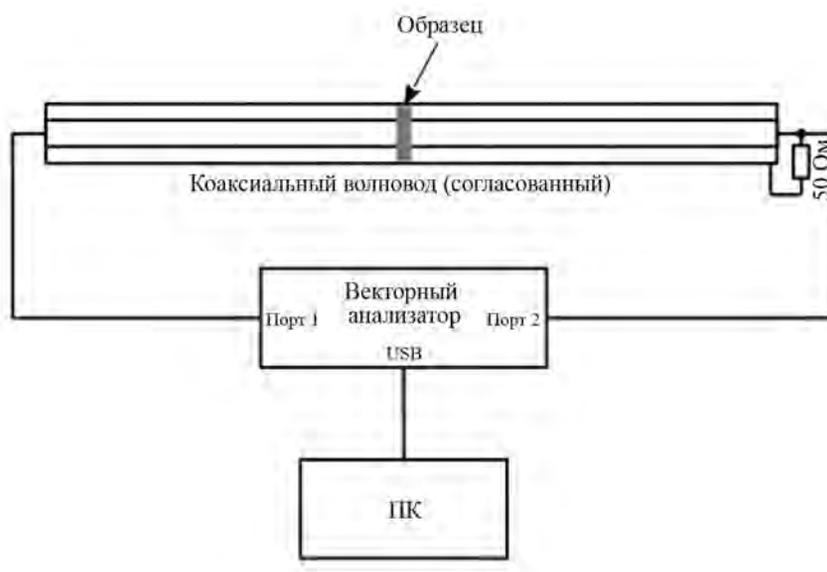
Для эффективного радиоэкранирования технических средств, при наличии отверстий в корпусе, требуется использование специального композита, обладающего существенными радиопоглощающими свойствами. Такими свойствами обычно обладают композиты, в состав которых входят электропроводящие материалы, в частности шунгит [8].

Способность шунгита экранировать и поглощать ЭМИ, а также восстановительные свойства к химически неустойчивым веществам и материалам, адсорбционные и абсорбционные свойства позволяют широко использовать этот минерал в различных отраслях промышленности и техники при создании разных материалов [9–10].

В работе исследованы элементные свойства образцов микропорошка, изготовленного из природного минерала шунгита. Такой порошок может применяться в качестве высокопроницаемого



**Рис. 1.** Измерительная установка на основе векторного анализатора “NanoVNA V2”, подключенного к персональному компьютеру, и коаксиального согласованно нагруженного волновода.



**Рис. 2.** Блок-схема измерительной установки.

наполнителя для создания радиопоглощающих материалов, поэтому вопрос исследования его свойств является актуальным. Исследование экранирующих и поглощающих ЭМИ свойств проведено путем измерений коэффициентов отражения, пропускания, поглощения и эффективного поглощения для изготовленного композитного материала на основе парафина и шунгита при различных концентрациях наполнителя. Выбор парафина обусловлен удобством изготовления образцов, а также близостью электромагнитных параметров парафина к аналогичным параметрам инженерных пластиков типа полиалкенов (полиэтилен, полипропилен и т.д.)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе поглощающие и экранирующие свойства композиционного материала были исследованы на высоких и сверхвысоких частотах с помощью векторного анализатора “NanoVNA V2”, подключенного к персональному компьютеру, и коаксиального согласованно нагруженного волновода, имеющего волновое сопротивление 50 Ом (рис. 1). Блок-схема измерительной установки представлена на рис. 2.

В работе использовался мелкодисперсный порошок шунгита с размерами частиц до 20 мкм и параметрами пористой структуры, определенными по

**Таблица 1.** Относительное (%) содержание компонентов в шунгите

Компонент	Содержание, %
Углерод (С)	41.1±0.3
Кислород (О)	30.0±0.2
Кремний (Si)	23.4±0.3
Алюминий (Al)	2.0±0.1
Железо (Fe)	1.7±0.3
Калий (К)	1.3±0.2
Магний (Mg)	0.3±0.1
Натрий (Na)	0.10±0.04

изотермам адсорбции паров азота при 77 К: удельная поверхность – от 6–20 м<sup>2</sup>/г, суммарный объем пор – до 0.05–0.15 см<sup>3</sup>/г при эффективном радиусе 3–10 нм. Исследуемый порошок был получен из шунгитовых пород Зажогинского месторождения, относится к III группе разновидностей шунгитных материалов и характеризуется разнообразием состава по содержанию минеральной основы, количеству углеродного вещества и наличием в шунгите наночастиц (фуллеренов) [8].

Относительные концентрации химических элементов в шунгите были определены посредством проведения рентгеноспектрального микроанализа. Элементный состав исследованного микропорошка шунгита по данным рентгеноспектрального микроанализа представлен в табл. 1. Полученные результаты по элементному составу шунгита хорошо коррелируют с экспериментальными данными других ранее выполненных работ [3, 4, 11].

Для исследования влияния величины концентрации были изготовлены образцы композиционного материала толщиной 10 мм из шунгита и вяжущего на основе парафина с 10, 30 и 50% концентрацией шунгита в них. Образцы № 1 (чистый парафин), № 2 (10% шунгита), № 3 (30% шунгита) и № 4 (50% шунгита) имели форму шайб внешним диаметром 18 мм и диаметром отверстия 8 мм.

Образцы помещались внутрь волновода, управление векторным анализатором осуществлялось при помощи компьютерной программы VNA View. С использованием данной программы были измерены S-параметры волновода с шайбами из композиционного материала. Измерения проводились в частотном диапазоне 500 МГц – 4 ГГц.

По экспериментально измеренным значениям S-параметров, были определены коэффициенты отражения ( $R$ ), пропускания ( $T$ ), поглощения ( $A$ ) и эффективного поглощения  $A_{\text{eff}}$ :

$$R = |S_{11}|^2,$$

$$T = |S_{21}|^2,$$

$$A = 1 - R - T,$$

$$A_{\text{eff}} = \frac{1 - R - T}{1 - R}.$$

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Зависимости коэффициентов отражения, пропускания, поглощения и эффективного поглощения от частоты для различных композитных образцов были обработаны, результаты представлены на рис. 3. Сплошными линиями обозначены частотные зависимости, соответствующие образцу № 1; штрихпунктирными линиями обозначены частотные зависимости для образца № 2; пунктирными линиями – для образца № 3; штриховыми линиями – для образца № 4 соответственно.

Результаты исследований показали, что увеличение концентрации шунгита в образце приводит к уменьшению коэффициента пропускания  $T$  ЭМИ, увеличению коэффициента отражения  $R$ , изменению коэффициента поглощения  $A$ , увеличению эффективного поглощения  $A_{\text{eff}}$ . Наблюдаемый характер зависимости поглощения от частоты ЭМИ указывает на увеличение радиопоглощающих свойств исследуемого композита с ростом частоты, несмотря на увеличение коэффициента отражения.

Измерения частотных зависимостей эффективного поглощения в исследуемых образцах показали наличие максимума поглощения в области частот от 500 МГц до 4 ГГц. Поглощение обусловлено наличием дисперсии углерода, а также связано с формированием связей внутри формируемого материала. Это позволяет предположить возможность использования данного материала в местах повышенной концентрации ЭМИ (например, местах размещения операторов радиолокационных станций на аэродромах).

Самый низкий коэффициент пропускания  $T$  ЭМИ в диапазоне частот 0.5–4 ГГц наблюдается у композита № 4 с наибольшей концентрацией шунгита и составляет 0.13 отн. ед. Для образца № 3 с содержанием шунгита 30% значения  $T$  в среднем ниже, чем для образца № 2 с содержанием шунгита 10%.

Изменение характеристик композитного материала приводит к изменениям коэффициентов отражения и эффективного поглощения покрытий. Более высокие значения коэффициентов отражения образца № 4 (максимальное значение  $R_{\text{max}}$  составляет 0.54 отн. ед.) связано с большей электрической проводимостью, более высокие значения эффективного поглощения – с диэлектрической проницаемостью шунгитовой породы [12]. Изменения коэффициентов отражения и эффективного

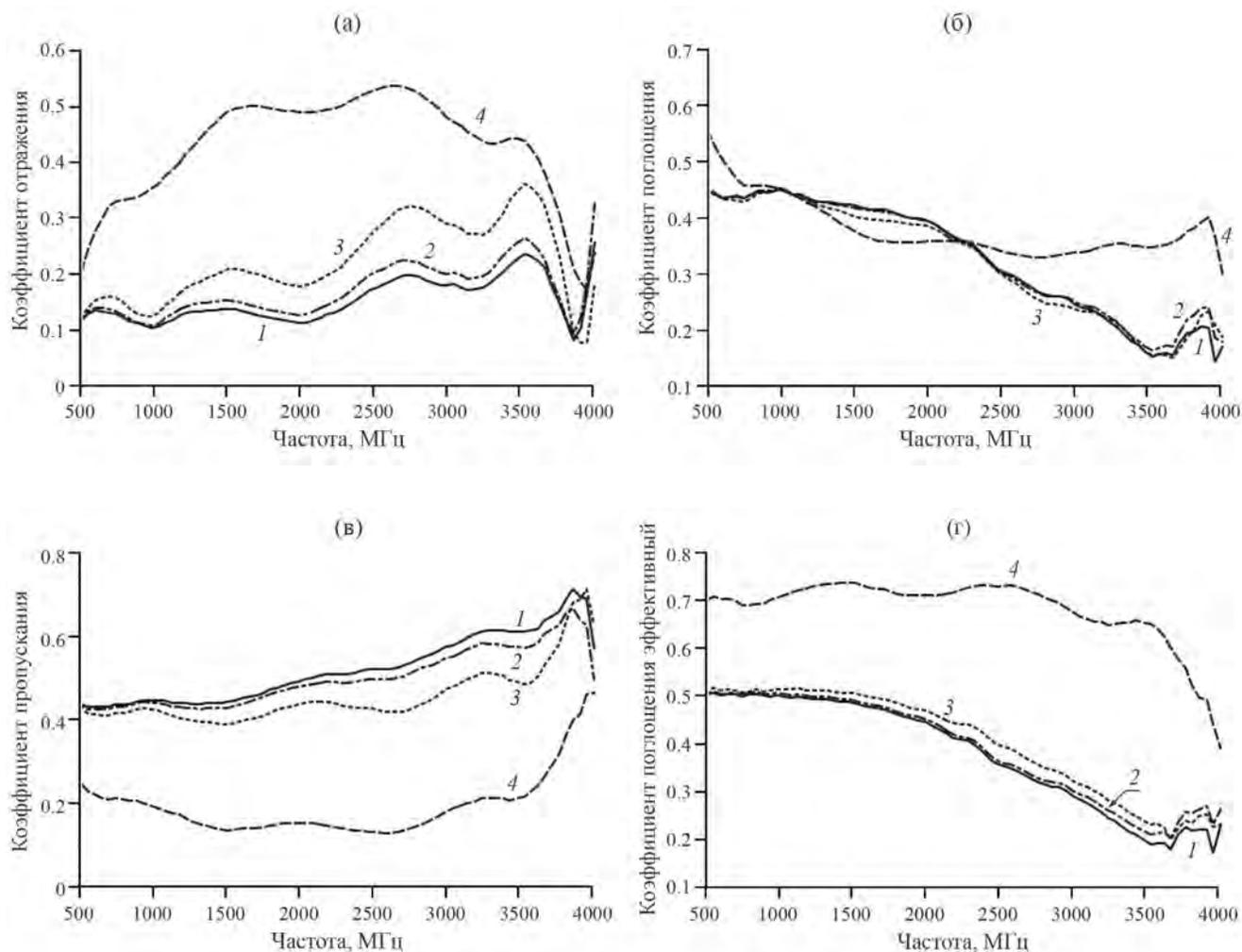


Рис. 3. Зависимости коэффициентов отражения (а), пропускания (б), поглощения (в) и эффективного поглощения (г) от частоты ЭМИ для различных композитных образцов: чистый парафин (1); шунгит 10 (2), 30 (3) и 50% (4).

поглощения, в свою очередь, приводят к изменениям коэффициентов поглощения и пропускания.

Сравнение эффективности радиопоглощения композитами на основе парафина с другими добавками радиопоглощающих наполнителей (например, по сравнению с золой рисовой шелухи и микропорошком латуни) [13] показало выраженную радиопоглощательную эффективность композита на основе шунгита для диапазонов сотовой связи.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение шунгита в качестве наполнителя композиционных материалов является перспективным для создания поглощающих и экранирующих материалов в местах с высокой плотностью ЭМИ, влияющих на здоровье человека. Использование шунгитосодержащих материалов целесообразно в качестве эффективных радиопоглощающих

и радиоэкранирующих материалов, при этом величина концентрации наполнителя существенным образом влияет на электромагнитные характеристики композиционного материала. Для защиты от ЭМИ наиболее оптимальным является соотношение 50% шунгита в образце. В то же время, например, для уменьшения радиолокационной заметности объектов, более предпочтительным является образец с более низкой отражательной способностью (30% шунгита). Изменяя концентрационные зависимости можно добиться максимума поглощения в интересующем или необходимом диапазоне электромагнитных волн.

Композиционный материал на основе шунгита с достаточной эффективностью может быть использован в качестве как экранирующего, так и поглощающего ЭМИ материала в различных сферах: в военной области для повышения скрытности радиозаметных областей (стелс-технология),

в области защиты персонала и технического оборудования от вредного воздействия электромагнитного излучения, в области защиты информации для подавления электромагнитного канала утечки информации, в других областях науки и техники.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кукина О.Б. // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Сер.: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2014. Вып. 2. № 9. С. 53.
2. Золотухин С.Н. // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Сер.: Высокие технологии. Экология. 2016. № 1. С. 115.
3. Golubev Y.A., Antonets I.V., Shcheglov V.I. // Materials Chemistry and Physics. 2019. V. 226. P. 195.
4. Antonets I.V., Golubev Y.A., Shcheglov V.I., Sun S. // Current Applied Physics. 2021. V. 29. P. 97.
5. Emelyanov S., Kuzmenko A., Rodionov V., Dobromyslov M. // J. of Nanoand Electronic Physics. 2013. V. 5. № 4. P. 40233.
6. Galautdinov A., Mukhametrakhimov R., Kupriyanov V. // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. P. 372.
7. Abdimuratov Zh.S., Manbetova Zh.D., Imankul M.N. et al. // Series of Geology and Technical Sciences. 2021. V. 445. № 1. P. 6.
8. Samukhina Yu.V., Nikoladze G.M., Kulkova T.A., Buryak A.K. // Russian J.of Physical Chemistry A. V. 97. № 2. P. 373.
9. Антоненц И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. // Журн. радиоэлектроники. 2017. № 9. С. 7.
10. Wells D., Egan J.A., Murphy D.G., Paret T. // Special Paper of the Geological Society of America. 2014. № 509. P. 199.
11. Fujita T., Aoki T., Ponou J. et al. // Minerals. 2021. V. 11. № 3. P. 245.
12. Chung D.D.L. // Carbon. 2001. V. 39. P. 279.
13. Buz'ko V., Shamray I., Goryachko A. et al. // E3S Web of Conferences. 2021. V. 263. P. 01013.

## STUDYING ELECTROMAGNETIC RADIATION SHIELDING AND ABSORBING PROPERTIES OF SHUNGITE-CONTAINING SUBSTANCES

Yu. V. Samukhina<sup>a, \*</sup> and A. K. Buryak<sup>a</sup>

<sup>a</sup>A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119071 Russia

\*e-mail: juliesam2008@mail.ru

**Abstract.** Fine-dispersed shungite as an effective filler of composite materials is studied. Experimental data on the influence of the filler concentration of the composite material on its electromagnetic radiation absorbing and shielding characteristics in the radio and microwave ranges are obtained. The obtained data can be used for manufacturing effective radio-absorbing materials and electromagnetic shields for protection against undesired effects of electromagnetic radiation, information protection, in radio engineering, as well as in warfare.

**Keywords:** shungite, electromagnetic radiation shields, radio-absorbing coatings, composite materials