

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

METHODICAL MATERIALS

Вестник Сыктывкарского университета.

Серия 1: Математика. Механика. Информатика. 2024.

Выпуск 4 (53)

Bulletin of Syktyvkar University.

Series 1: Mathematics. Mechanics. Informatics. 2024; 4 (53)

Научная статья

УДК 517.9, 539.3

https://doi.org/10.34130/1992-2752_2024_4_69

Автоматизированный анализ изображений микроскопии шунгитов

Владимир Александрович Устюгов¹,
Игорь Викторович Антонец¹,
Евгений Александрович Голубев²

¹Сыктывкарский государственный университет
имени Питирима Сорокина, ustyugov@syktsu.ru

²Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, golubev@geo.komisc.ru

Аннотация. Работа посвящена вопросам автоматизированного анализа изображений высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии образцов шунгита с применением технологии компьютерного зрения. Описана методика предварительной обработки изображений. Разработан алгоритм выделения структурных элементов шунгита на основе метода поиска по шаблону.

Ключевые слова: шунгит, электронная микроскопия, компьютерное зрение

Финансирование. Статья подготовлена в рамках государственного задания ФГБОУ ВО «СГУ имени Питирима Сорокина» от 17.01.2024 № 075-03-2024-162 по теме «Влияние структуры на статические и динамические электропроводящие свойства разупорядоченного углерода».

Для цитирования: Устюгов В. А., Антонец И. В., Голубев Е. А. Автоматизированный анализ изображений микроскопии шунгитов // *Вестник Сыктывкарского университета. Сер. 1: Математика. Механика. Информатика*. 2024. Вып. 4 (53). С. 69–83. https://doi.org/10.34130/1992-2752_2024_4_69

Article

AUTOMATED ANALYSIS OF SHUNGITE MICROSCOPY IMAGES

Vladimir A. Ustyugov, Igor V. Antonets, Evgeny A. Golubev

¹Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, ustyugov@syktsu.ru

²Institute of Geology, Federal Research Centre Komi Science Centre, Ural Branch, RAS, golubev@geo.komisc.ru

Abstract. The paper is devoted to the issues of automated analysis of high-resolution transmission electron microscopy images of shungite samples using computer vision technology. The technique of image preprocessing is described. An algorithm for the selection of shungite structural elements based on the template search method is developed.

Keywords: shungite, electron microscopy, computer vision

Funding. The article was prepared within the framework of the state assignment of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education „SSU named after Pitirim Sorokin“ dated January 17, 2024 No 075-03-2024-162 on the topic „The influence of structure on the static and moving electrically conductive properties of a disordered formation“.

For citation: Ustyugov V. A., Antonets I. V., Golubev E. A. Automated analysis of shungite microscopy images. *Vestnik Syktyvkarского университета. Seriya 1: Matematika. Mekhanika. Informatika* [Bulletin of Syktyvkar University, Series 1: Mathematics. Mechanics. Informatics], 2024, no 4 (53), pp. 69–83. https://doi.org/10.34130/1992-2752_2024_4_69

1. Введение

Шунгитовым называют углерод, который в различной форме проявлений и с различной концентрацией присутствует в горных породах Карелии в районе Онежского озера [1]. Вопрос о строгом описании его структуры является дискуссионным, что проявляется в существовании как минимум трех структурных моделей [2]. Ключевым методом для изучения строения разупорядоченных углеродных веществ является микроскопия высокого разрешения [3; 4]. Согласно данному методу, шунгитовый углерод состоит из графеновых слоев, размеры которых составляют первые нанометры, и их разнообразных агрегатов в виде стопок графеновых слоев, лент, многослойных фуллереноподобных глобул. Углерод шунгитов проявляет себя как слабо упорядоченный графит [5], аморфный углерод [6], фуллереноподобный углерод [7] и др. При этом даже современные методы изучения не позволяют построить однозначную картину распределения этих структурных единиц, оценить их отношения, найти преобладающий тип структуры.

2. Методы и материалы

Современные представления о структуре шунгитового углерода сформировались прежде всего по данным высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии (ВРПЭМ, далее — ЭМ) [2; 8–10].

Основными наноструктурными элементами шунгитового углерода являются пачки графеновых слоев, ленты и многослойные фуллереноподобные глобулы.

Пачки представляют собой собранные в стопку графеновые слои со средним расстоянием между слоями около 0.350 нм, размеры их составляют первые нанометры. Слои чаще всего слегка изогнутые. На рис. 1а черной рамкой обведена характерная компактная пачка.

Лента представляет собой протяженный (до нескольких десятков нанометров) агрегат графеновых слоев толщиной в несколько слоев, многократно изогнутый и часто перевитый. Основным отличием пачек от лент мы считаем отношение длины к ширине этой наноструктуры. Для целей исследования мы вводим величину 3:1 как границу, отделяющую ленту (где это соотношение больше) от пачки (где это соотношение меньше или равно). На рис. 1а внутри белой рамки находится лента со слоями, изгибающимися практически под прямым углом.

Из-за сложной и незакономерной наноструктуры чаще всего доступно только ее качественное описание. На этом фоне перспективным пу-

тем оценки структурной упорядоченности и пористости является математическая обработка картин ЭМ. В частности, путем ручной обработки картин микроскопии, например, была обнаружена связь с проводимостью некоторых структурных характеристик шунгитового углерода [11–14]. Взаимосвязь электрических, проводящих и отражающих свойств шунгитов с их структурными характеристиками описаны авторами, использующими и другие математические модели [15–17]. Автоматизированная обработка картин ЭМ позволяет исключить субъективный момент из анализа и сделать результаты доступными и проверяемыми для других исследователей.

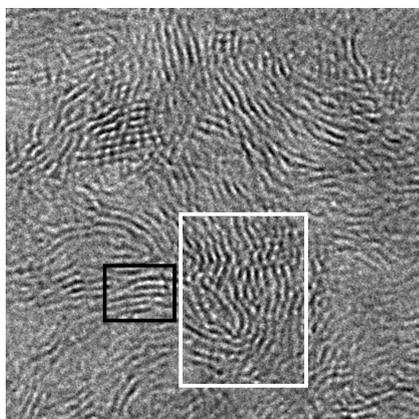


Рис. 1а. Исходное изображение карты шунгита

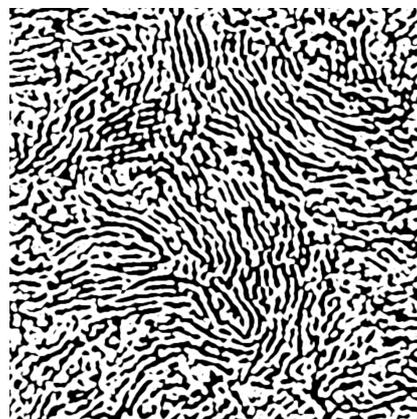


Рис. 1б. Карта шунгита после фильтрации

Целью настоящего исследования является цифровая обработка изображений ЭМ шунгитового углерода с целью выделить характерные структурные элементы. Для решения описанной задачи был разработан алгоритм с использованием технологии компьютерного зрения на базе языка Python, популярного инструмента для анализа данных (см., например, [18; 19]).

3. Применение метода компьютерного зрения для анализа изображений ВРПЭМ шунгита

3.1. Предварительная обработка изображения

Изображения шунгита, получаемые методом ЭМ (пример на рис. 1а) имеют малый уровень контраста и высокую степень зашумленности, что делает невозможным прямое применение алгоритмов анализа без предварительной обработки.

Для обработки была выбрана следующая последовательность процедур фильтрации:

1. Незначительное общее поднятие контраста изображения для улучшения работы последующих фильтров.
2. Медианный фильтр, предназначенный для подавления импульсных помех в сигнале, позволяющий эффективно удалить мелкий шум, за счёт чего происходит «слияние» в единые элементы имеющих на изображениях ЭМ полос.
3. Фильтр «Разница по Гауссу», представляющий собой алгоритм поиска краёв на изображении за счёт нахождения разницы результатов двух гауссовых размываний; при обработке ЭМ позволяет повысить чёткость границ искомых элементов.
4. Фильтр Собеля, позволяющий дополнительно уточнить границы элементов и эффективно отделить от них пиксели, находящиеся между элементами и содержащие шумовую информацию. Эти пиксели в последующем удаляются в автоматическом режиме.

Обработка производилась с использованием свободного программного обеспечения Gimp 2, но её можно реализовать и в виде программного алгоритма с использованием библиотек для языка Python из пакета scikit-image или конвейерного редактора изображений ImageMagick. Выполнение указанных процедур позволяет радикально очистить изображение ЭМ шунгита от шума (рис. 1b).

3.2. Поиск структурных элементов шунгита на изображениях микроскопии

Задачу поиска объекта на изображении (по англ. Object detection) можно решать различными программными средствами. В рамках данного исследования был разработан алгоритм на основе компонента Template Matching (поиск по шаблону) библиотеки компьютерного зрения OpenCV для языка Python.

Функция Template Matching требует для работы два изображения — исходное, на котором производится поиск, и шаблона, который по размеру в пикселях не должен превышать исходное. Программный алгоритм библиотеки последовательно совмещает шаблон со всеми возможными участками исходного изображения, вычисляя специальную метрику для оценки сходства. Библиотека поддерживает шесть различных

метрик, из которых можно выбрать ту, которая позволяет получить наиболее точный результат для исследуемой карты шунгита. Так, для реализации алгоритма использовалась метрика следующего вида (в терминах библиотеки TM_SQDIFF_NORMED):

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} (T(x', y') - I(x + x', y + y'))^2}{\sqrt{\sum_{x', y'} T(x', y')^2 \sum_{x', y'} I(x + x', y + y')^2}}, \quad (1)$$

где $T(x, y)$ — значения пикселей шаблонного изображения, $I(x, y)$ — пиксели исходного. Функция возвращает матрицу, в ячейках которой записаны значения метрики.

В дальнейшем, анализируя массив и находя ячейки со значением, близким к минимальному или максимальному (в зависимости от конкретной выбранной метрики), можно определить участки изображения, наиболее схожие с выбранным шаблоном.

Для улучшения точности работы алгоритм был разбит на две части. Перед непосредственным поиском пачек и лент на изображении определялись неконтрастные области без четко выраженной структуры с помощью специального шаблона с шумом.

Рассмотрим подробнее программную реализацию анализа поиска структурных элементов на изображениях ЭМ с фрагментами программного кода.

Перед работой с изображениями необходимо перевести их в монохромное цветовое пространство, в противном случае возникает необходимость работы с многомерными массивами. Эта процедура выполняется встроенными в OpenCV функциями:

```
src = cv2.imread("cart-test.jpg")
pattern = cv2.imread("noise-pattern.jpg")
src = cv2.cvtColor(src, cv2.COLOR_RGB2GRAY)
pattern = cv2.cvtColor(pattern, cv2.COLOR_RGB2GRAY)
```

Файл `cart-test.jpg` содержит исходную карту, файл `noise-pattern.jpg` — шаблон с шумом.

Задаем метод вычисления метрики и вызываем основную функцию для работы с шаблоном. Матрица `result` является программной реализацией матрицы из формулы (1). Функция `minMaxLoc` возвращает максимальное, минимальное значения в матрице и их позиции:

```
method = cv2.TM_SQDIFF_NORMED
result = cv2.matchTemplate(src2, pattern, method)
```

Исходная исследуемая карта и графическое отображение получаемой матрицы `result` показаны на рис. 2. Обратим внимание на то, что размер изображения на рис. 2b меньше, чем на рис. 2a, что связано с алгоритмом работы функции `matchTemplate`, при котором сравнение шаблона с фрагментами основного изображения может производиться только в пределах последнего. Отсюда следует, что размерность матрицы `result` меньше размера исходного изображения в пикселях на размер шаблона.

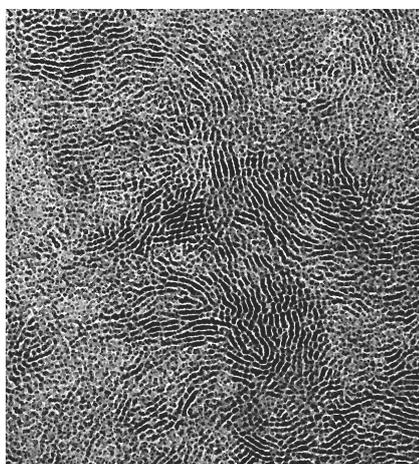
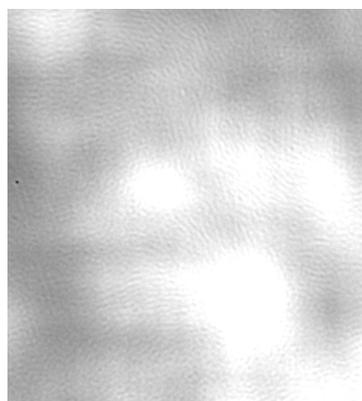


Рис. 2a. Исследуемая карта шунгита

Рис. 2b. Матрица `result`

Вследствие того что мы используем метрику `TM_SQDIFF_NORMED`, наибольшее сходство соответствует минимальным значениям ячеек матрицы, соответственно более темные области на рис. 2b соответствуют шумовым областям, более светлые — областям с выраженной полосовой структурой. Именно в последних имеет смысл искать структурные элементы.

Определение пачек и лент производилось аналогичным описанному выше методом с использованием метрики `TM_CCOEFF_NORMED`. Функция `matchTemplate` при использовании шаблона с полосами возвращает новый массив `result_map`. Задавая определенное пороговое значение `threshod`, из этого массива можно отобрать набор точек, которые предварительно являются искомыми, то есть соответствуют областям карты со структурными элементами:

```
match_loc = min_loc
(xCoords, yCoords) =
    np.where(result > threshold * result_map[match_loc])
```

Поскольку функция `matchTemplate` производит последовательный обход изображения, и в той области, которая близка по содержанию к шаблону, возникает множество точек матрицы `result_map` с близкими значениями. Для решения этой проблемы был адаптирован код функции `pop_max_suppression`¹, позволяющий из множества накладывающихся друг на друга и схожих с шаблоном областей выбирать одну, после чего она обводится прямоугольной рамкой для визуального контроля.

Последняя стадия фильтрации областей, соответствующих шаблону поиска, заключалась в отборе тех, которые лежат в пределах нешумовых регионов (светлые области на рис. 2b).

Итоговый набор отобранных областей, наложенных на исходную карту, изображен на рис. 3. На этом же рисунке в виде наложенного полупрозрачного слоя представлен результат поиска шумовых областей, отдельно изображенный на рис. 2b.

4. Заключение

Обнаруженным недостатком метода поиска по шаблону применительно к изображениям ЭМ является невысокая точность и негибкость. Для определения лент, ориентированных под углом, имеющих различную длину и ширину, необходимо модифицировать шаблон поиска (библиотека `OpenCV` имеет встроенную функцию для аффинных преобразований изображений, например вращений и растяжений) и использовать метод прямого перебора. При этом метод перебора, очевидно, не подходит для поиска искривленных лент. Вероятно, наиболее рациональным подходом, обеспечивающим высокую адаптивность к сложно структурированным изображениям, будет применение нейросетевой технологии.

Анализируя рис. 3, можно видеть, что разработанная программа позволяет обнаруживать четко определяемые пачки, а протяженные ленты разбивает на отдельные фрагменты, считая их пачками. Также описанный выше алгоритм позволяет удовлетворительно отделить сильно зашумленные области, непригодные для дальнейшего анализа.

¹Оригинал доступен по ссылке: <https://pyimagesearch.com/2015/02/16/faster-non-maximum-suppression-python/> (дата обращения: 31.10.2024).

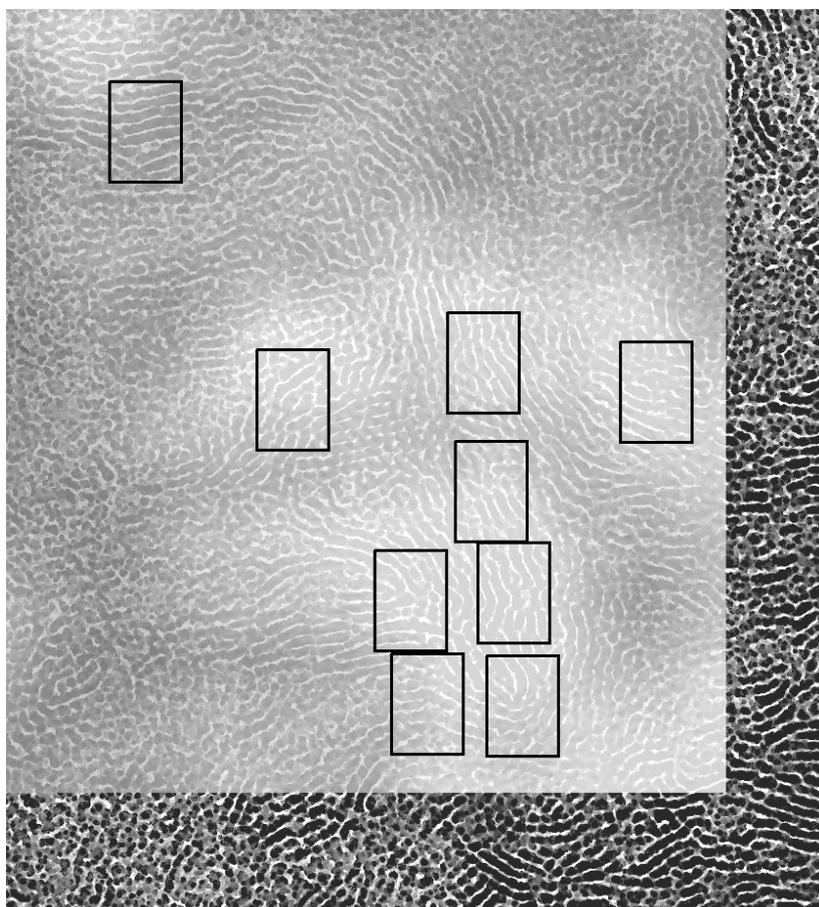


Рис. 3. Результат работы алгоритма

Данную часть программы можно применять как фильтр в дальнейших разработках более совершенных систем распознавания структурных элементов шунгита.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Melezhik V. A., Filippov M. M., Romashkin A. E. A giant palaeoproterozoic deposit of shungite in NW Russia: Genesis and practical applications // *Ore Geol. Rev.* 2004. Vol. 24. Pp. 135–154. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2003.08.003.
2. Golubev Ye. A., Antonets I. V., Korolev R. I. et al. Characterization of nanostructure of naturally occurring

- disordered sp² carbon by impedance spectroscopy // *Materials Chemistry and Physics*. 2024. Vol. 317. P. 129181. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2024.129181.
3. **Harris P. J. F.** New perspectives on the structure of graphitic carbons // *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* 2005. Vol. 30. Pp. 235–253. DOI: 10.1080/10408430500406265.
 4. **Toth P.** Nanostructure quantification of turbostratic carbon by HRTEM image analysis: State of the art, biases, sensitivity and best practices // *Carbon*. 2021. Vol. 178. Pp. 688–707. DOI: 10.1016/j.carbon.2021.03.043.
 5. **Kviecinska B.** Investigations of shungite // *Bull. Polish Acad. Sci. (Chem.)* 1968. Vol. 16. Pp. 61–65.
 6. **Buseck P. R., Huang B. J.** Conversion of carbonaceous material to graphite during metamorphism // *Geochem. Cosmochim. Acta*. 1985. Vol. 49. Pp. 2003–2016. DOI: 10.1016/0016-7037(85)90059-6.
 7. **Kovalevski V. V.** Structure of shungite carbon // *Russ. J. Inorg. Chem.* 1994. Vol. 39. Pp. 28–32.
 8. **Golubev Ye. A., Antonets I. V.** Electrophysical Properties and Structure of Natural Disordered sp² Carbon // *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12 (21). P. 3797. DOI: 10.3390/nano12213797.
 9. **Kovalevski V. V., Rozhkova N. N., Zaidenberg A. Z., Yermolin A. P.** Fullerene-like structures in shungite and their physical properties // *Mol. Mater.* 1994. Vol. 4. Pp. 77–80.
 10. **Sheka E. F., Rozhkova N. N., Holderna-Natkaniec K., Natkaniec I.** Nanoscale reduced-graphene-oxide origin of shungite in light of neutron scattering // *Nanosystems: Phys. Chem. Math.* 2014. Vol. 5. Pp. 659–672.
 11. **Antonets I. V., Golubev E. A., Shavrov V. G., Shcheglov V. I.** Investigation of electrical conductivity of graphene-contained shungite using the high-resolution scanning electron microscopy // *Journal of Radio Electronics* 2021. No 3. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.3.9.

12. **Antonets I. V., Golubev Y. A., Ignatiev G. V. et al.** Influence of layers orientation of graphene stacks in shungite disordered carbon to its integral electrical conductivity // *J. Phys. Confer. Ser.* 2022. Vol. 2315. 012039. DOI: 10.1088/1742-6596/2315/1/012039.
13. **Antonets I. V., Golubev Y. A., Shcheglov V. I.** Application of the trinary discretization method for the structural analysis of natural disordered sp² carbon // *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*. 2024. Vol. 32. Issue 3. Pp. 246–253. DOI: 10.1080/1536383X.2023.2273416.
14. **Antonets I. V., Golubev Y. A., Shcheglov V. I.** Evaluation of microstructure and conductivity of two-phase materials by the scanning spreading resistance microscopy (the case of shungite) // *Ultramicroscopy*. 2021. Vol. 222. P. 113212. DOI: 10.1016/j.ultramic.2021.113212.
15. **Antonets I. V., Golubev Y. A., Shcheglov V. I. et al.** Estimation of local conductivity of disordered carbon in a natural carbon-mineral composite using a model of intragranular currents // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2022. Vol. 171. P. 110994. DOI: 10.1016/j.jpics.2022.110994.
16. **Antonets I. V., Golubev Y. A., Shcheglov V. I.** The effect of structure on the conductivity of disordered carbon (the case of graphene-containing shungite) // *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*. 2023. Vol. 31. Issue 10. Pp. 961–970. DOI: 10.1080/1536383X.2023.2226273.
17. **Golubev Y. A., Antonets I. V., Shcheglov V. I.** Static and dynamic conductivity of nanostructured carbonaceous shungite geomaterials // *Materials Chemistry and Physics*. 2019. Vol. 226. Pp. 195–203. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.01.033.
18. **Бабикова Н. Н., Котелина Н. О., Тентюков Ф. Н.** Анализ данных о лесных пожарах в Республике Коми с помощью Excel и Python. *Вестник Сыктывкарского университета. Сер. 1: Математика. Механика. Информатика*. 2023. Вып. 4 (49). С. 29–46. DOI: 10.34130/1992-2752_2023_4_29.

19. **Бабикова Н. Н.** Применение библиотеки NumPy для векторизации кода Python // *Вестник Сыктывкарского университета. Сер. 1: Математика. Механика. Информатика.* 2023. Вып. 1 (46). С. 14–29. DOI: 10.34130/1992-2752_2023_14.

References

1. **Melezhik V. A., Filippov M. M., Romashkin A. E.** A giant palaeoproterozoic deposit of shungite in NW Russia: Genesis and practical applications. *Ore Geol. Rev.* 2004. Vol. 24. Pp. 135–154. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2003.08.003.
2. **Golubev Ye. A., Antonets I. V., Korolev R. I. et al.** Characterization of nanostructure of naturally occurring disordered sp² carbon by impedance spectroscopy. *Materials Chemistry and Physics.* 2024. Vol. 317. P. 129181. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2024.129181.
3. **Harris P. J. F.** New perspectives on the structure of graphitic carbons. *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* 2005. Vol. 30. Pp. 235–253. DOI: 10.1080/10408430500406265.
4. **Toth P.** Nanostructure quantification of turbostratic carbon by HRTEM image analysis: State of the art, biases, sensitivity and best practices. *Carbon.* 2021. Vol. 178. Pp. 688–707. DOI: 10.1016/j.carbon.2021.03.043.
5. **Kviecinska B.** Investigations of shungite. *Bull. Polish Acad. Sci. (Chem.)* 1968. Vol. 16. Pp. 61–65.
6. **Buseck P. R., Huang B. J.** Conversion of carbonaceous material to graphite during metamorphism. *Geochem. Cosmochim. Acta.* 1985. Vol. 49. Pp. 2003–2016. DOI: 10.1016/0016-7037(85)90059-6.
7. **Kovalevski V. V.** Structure of shungite carbon. *Russ. J. Inorg. Chem.* 1994. Vol. 39. Pp. 28–32.
8. **Golubev Ye. A., Antonets I. V.** Electrophysical Properties and Structure of Natural Disordered sp² Carbon. *Nanomaterials.* 2022. Vol. 12 (21). P. 3797. DOI: 10.3390/nano12213797.

9. **Kovalevski V. V., Rozhkova N. N., Zaidenberg A. Z., Yermolin A. P.** Fullerene-like structures in shungite and their physical properties. *Mol. Mater.* 1994. Vol. 4. Pp. 77–80.
10. **Sheka E. F., Rozhkova N. N., Holderna-Natkaniec K., Natkaniec I.** Nanoscale reduced-graphene-oxide origin of shungite in light of neutron scattering. *Nanosystems: Phys. Chem. Math.* 2014. Vol. 5. Pp. 659–672.
11. **Antonets I. V., Golubev E. A., Shavrov V. G., Shcheglov V. I.** Investigation of electrical conductivity of graphene-contained shungite using the high-resolution scanning electron microscopy. *Journal of Radio Electronics* 2021. No 3. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.3.9.
12. **Antonets I. V., Golubev Y. A., Ignatiev G. V. et al.** Influence of layers orientation of graphene stacks in shungite disordered carbon to its integral electrical conductivity. *J. Phys. Confer. Ser.* 2022. Vol. 2315. 012039. DOI: 10.1088/1742-6596/2315/1/012039.
13. **Antonets I. V., Golubev Y. A., Shcheglov V. I.** Application of the trinary discretization method for the structural analysis of natural disordered sp² carbon. *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures.* 2024. Vol. 32. Issue 3. Pp. 246–253. DOI: 10.1080/1536383X.2023.2273416.
14. **Antonets I. V., Golubev Y. A., Shcheglov V. I.** Evaluation of microstructure and conductivity of two-phase materials by the scanning spreading resistance microscopy (the case of shungite). *Ultramicroscopy.* 2021. Vol. 222. P. 113212. DOI: 10.1016/j.ultramic.2021.113212.
15. **Antonets I. V., Golubev Y. A., Shcheglov V. I. et al.** Estimation of local conductivity of disordered carbon in a natural carbon-mineral composite using a model of intragranular currents. *Journal of Physics and Chemistry of Solids.* 2022. Vol. 171. P. 110994. DOI: 10.1016/j.jpics.2022.110994.
16. **Antonets I. V., Golubev Y. A., Shcheglov V. I.** The effect of structure on the conductivity of disordered carbon (the case of graphene-containing shungite). *Fullerenes Nanotubes and*

Carbon Nanostructures. 2023. Vol. 31. Issue 10. Pp. 961–970. DOI: 10.1080/1536383X.2023.2226273.

17. **Golubev Y. A., Antonets I. V., Shcheglov V. I.** Static and dynamic conductivity of nanostructured carbonaceous shungite geomaterials. *Materials Chemistry and Physics*. 2019. Vol. 226. Pp. 195–203. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.01.033.
18. **Babikova N. N., Kotelina N. O., Tentyukov F. N.** Analysis of data on forest fires in the Komi Republic using Excel and Python. *Vestnik Syktyvkar'skogo universiteta. Seriya 1: Matematika. Mekhanika. Informatika* [Bulletin of Syktyvkar University, Series 1: Mathematics. Mechanics. Informatics]. 2023. No 4 (49). Pp. 29–46. DOI: 10.34130/1992-2752_2023_4_29. (In Russ.)
19. **Babikova N. N.** Using NumPy to vectorization of Python code. *Vestnik Syktyvkar'skogo universiteta. Seriya 1: Matematika. Mekhanika. Informatika* [Bulletin of Syktyvkar University, Series 1: Mathematics. Mechanics. Informatics]. 2023. No 1 (46). Pp. 14–29. DOI: 10.34130/1992-2752_2023_1_14. (In Russ.)

Сведения об авторах / Information about authors

Устюгов Владимир Александрович / Vladimir A. Ustyugov

к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой информационной безопасности / Candidate of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of the Information Security Department

Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина / Pitirim Sorokin Syktyvkar State University

167001, Россия, г. Сыктывкар, Октябрьский пр., 55 / 55, Oktyabrsky Ave., Syktyvkar, 167001, Russia

Антонетц Игорь Викторович / Igor V. Antonets

к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры радиофизики и электроники / Candidate of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of the Radiophysics and Electronics Department

Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина / Pitirim Sorokin Syktyvkar State University

167001, Россия, г. Сыктывкар, Октябрьский пр., 55 / 55, Oktyabrsky Ave., Syktyvkar, 167001, Russia

Голубев Евгений Александрович / Evgeny A. Golubev

д.г.-м.н., ведущий научный сотрудник / Doctor of Geology and Mineralogy, leading researcher

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН / Institute of Geology, Federal Research Centre Komi Science Centre, Ural Branch, RAS

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 54 / 4, Pervomayskaya str., Syktyvkar, 167982, Russia

Статья поступила в редакцию / The article was submitted 01.11.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after reviewing 27.12.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 06.12.2024