

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.7.13>

УДК: 537.874; 537.624

## АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ГРАФЕНОСОДЕРЖАЩЕГО ШУНГИТА ПО ДАННЫМ РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

И.В.Антонец<sup>1</sup>, В.А.Устюгов<sup>1</sup>, В.И.Щеглов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сыктывкарский государственный университет им. П. Сорокина,  
167001, Сыктывкар, Октябрьский просп., 55

<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,  
125009, Москва, ул. Моховая, 11-7

Статья поступила в редакцию 15 апреля 2025 г.

**Аннотация.** Приведен краткий обзор общих характеристик графеносодержащего высокоуглеродистого шунгита как материала для создания экранов для электромагнитного излучения. Отмечено, что проводящие свойства, определяющие экранирующую способность, в значительной степени зависят от структуры и распределения графеновых слоев внутри материала. В качестве важнейшего инструмента, позволяющего исследовать структуру шунгита на наноуровне отмечена растровая электронная микроскопия. Выполнено рассмотрение полученных этим методом карт распределения углерода с помощью структурной дискретизации по трем уровням. Отмечены три градации однородности в пределах одной ячейки дискретизации: высокая, когда слои графена почти непрерывны, средняя, когда слои графена имеют разрывной характер, низкая, когда четко выраженные слои графена отсутствуют. Исследование проведено двумя методами – ручным и машинным. Описана методика ручной обработки с помощью подвижной маски, последовательно проходящей по ячейкам карты. Описана методика машинной обработки,

состоящей в измерении энтропии по Шеннону для каждой ячейки по отдельности. Выполнено сравнение результатов ручной обработки с машинной. Установлено, что в общем совпадение между методами составляет 67%, а отсутствие совпадений – 33%. При этом наилучшее совпадение имеет место по средней степени упорядоченности (26%), что заметно выше, чем совпадение по высокой (17%) и низкой (23%) степеням упорядоченности. На основе полученных результатов был сделан вывод о высокой степени эффективности замены ручной обработки машинной. Приведены рекомендации для дальнейшего развития работы.

**Ключевые слова:** графеносодержащий шунгит, растровая электронная микроскопия, энтропия по Шеннону.

**Финансирование:** Исследование выполнено в рамках госзадания ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина» № 075-03-2024-162 по теме «Влияние структуры на статические и динамические электропроводящие свойства разупорядоченного углерода», а также в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

**Автор для переписки:** Щеглов Владимир Игнатьевич, [vshcheg@cplire.ru](mailto:vshcheg@cplire.ru)

## Введение

Шунгит – докембрийская горная порода, по происхождению близкая к каменному углю, но в отличие от последнего, в основе которого лежит торф, сформировавшаяся на основе нефти [1,2]. Вследствие происхождения шунгит распространен в нефтеносных районах, в первую очередь – на севере вблизи Ледовитого океана, воды которого изобилуют морскими водорослями. Значительные залежи Шунгита располагаются на Карельском перешейке и на Новой Земле (месторождения – Шуньга, Максово, Нигозеро и другие) [3-5].

По структуре шунгит представляет собой области углерода, перемежающиеся прослойками кварца в виде песка. Содержание углерода по массе в шунгите колеблется от 3% до 97% [1-6]. Для практики

наибольший интерес представляет высокоуглеродистый шунгит с содержанием углерода 80-90%.

С древних времен шунгит использовался в качестве топлива по калорийности близкого к каменному углю. В то же время, важнейшим свойством высокоуглеродистого шунгита является его высокая электрическая проводимость – от 1500 до 9000 См м<sup>-1</sup>

Такая проводимость позволяет на его основе создать экраны, надежно экранирующие, отражающие или поглощающие электромагнитное излучение в широком диапазоне частот – от десятков килогерц до сотен и тысяч мегагерц [6-21].

В структурном плане на наноуровне шунгит представляет собой конгломерат из различным образом расположенных и ориентированных слоев графена [22-26], формирующих пачки, глобулы, ленты и другие почти хаотические образования [6,27-29].

Для анализа распределения углерода в таких структурах весьма удобен метод высокоразрешающей растровой электронной микроскопии [30,31].

Этот метод позволяет получить карты распределения углерода, имеющие весьма сложный характер в виде с некоторой периодичностью расположенных темных и светлых полос, образующих пачки, разорванные куски, или протяженные ленты [6,27-29], отражающие конфигурацию слоев графена.

В работах [32-37] предложены различные методы определения удельной проводимости шунгита по его структурным характеристикам, получаемым на основе анализа таких карт.

Однако предложенные методы опробованы на небольшом числе измерений (1-2 карты и отдельные участки карт), не позволяющем судить о статистических характеристиках параметров структуры.

В работе [38] выполнено изучение структурных параметров шунгита на основе сравнительного анализа нескольких карт, снятых в различных участках образца. В качестве рабочего инструмента используется метод структурной дискретизации [39-41] по трем уровням.

В работах [42-44] выявлена связь структурных параметров материала с его интегральной удельной проводимостью,

Полученные результаты представляют достаточно объективный метод определения удельной проводимости шунгита по структурным характеристикам распределения углерода, полученным методом высокоразрешающей растровой электронной микроскопии.

В то же время, в перечисленных работах дискретизация по трем уровням выполнена методом визуальной ручной обработки, что можно считать недостаточно объективным из-за физиологических особенностей зрения. Поэтому настоящая работа посвящена разработке машинного метода определения уровней дискретизации на основе алгоритма определения энтропии в отдельных областях дискретизации. С целью сопоставления с результатами предыдущих работ выполнено сравнение визуальной дискретизации с машинной. Дополнительным результатом можно считать предварительную оценку степени однородности карты.

## **1. Исследуемые карты и методика дискретизации**

Исследования были выполнены на образце, содержащем 97% углерода. Внешние размеры образца по площади – 5x5 мм, по толщине – 0,2 мм. Для исключения влияния возможных неоднородностей образца на результаты измерений, методом растровой микроскопии были сняты 10 карт, распределенных равномерно в различных частях образца с расстояниями между точками измерений 1-2 мм.

Карты снимались в размере 40x40 нм. Дискретизация осуществлялась с помощью наложения квадратной сетки, содержащей 20 на 20 ячеек, так что размер каждой ячейки составлял 2x2 нм. Размер ячеек был выбран, исходя из типичного размера графеновой пачки – 2-4 нм с числом слоев 4-5 (каждый слой по 0.3-0.4 нм) и столько же (или на единицу меньше) промежутков между ними (тоже по 0.3-0.4 нм). В качестве «полосы» считался один слой

графена с одним промежутком. То есть одна ячейка сетки содержала 3-5 таких полных полос.

Обратимся к рис. 1, где показана типичная схема дискретизации карты путем наложения сетки. На рис. 1а приведена карта в исходном состоянии, на рис. 1б – сетка, предназначенная для наложения на карту, на рис. 1в – карта с наложенной на нее сеткой.

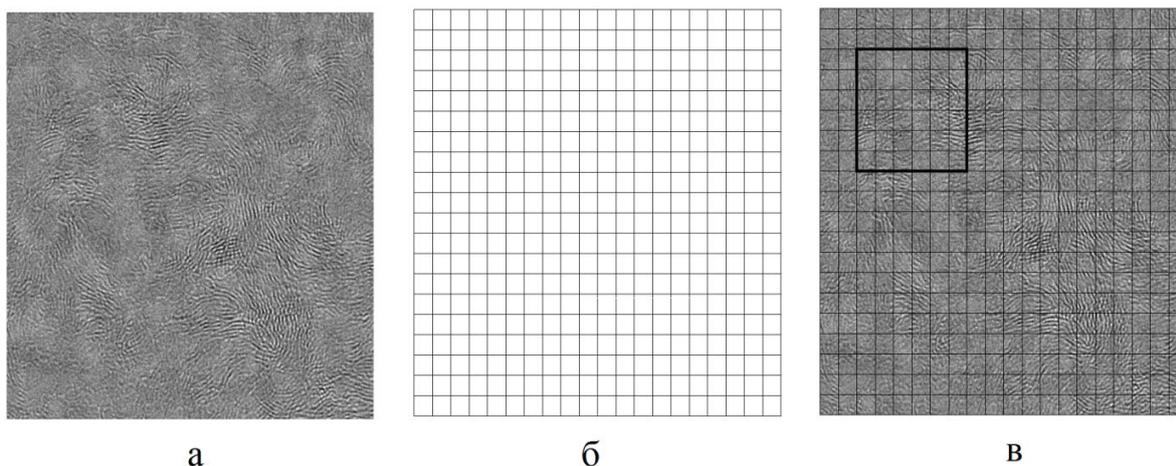


Рис. 1. Дискретизация карты путем наложения сетки.  
а – исходная карта; б – сетка; в – карта с наложенной сеткой, рамка – выделение 6х6 ячеек для последующего сравнения.

Полная карта содержит слишком много ячеек (400), одновременный их анализ неудобен, поэтому для предварительного рассмотрения ограничимся фрагментом карты, отмеченным рамкой на рис. 1в (36 ячеек). Фрагмент используется только для максимальной наглядности описания методики работы с картой и имеет иллюстративный характер. В этом отношении его место расположения критичным не является и выбрано здесь только для удобства картинки. Подробное рассмотрение полных карт будет выполнено далее.

После дискретизации карты дальнейший анализ проводился в каждой ячейке по отдельности. Оценивалась степень однородности слоев графена в пределах ячейки. Выделялись три градации однородности.

Первая – высокая: слои графена почти непрерывны, параллельны друг другу и проходят через всю или значительную часть ячейки без разрывов, выражена четкая ориентация слоев.

Вторая – средняя: слои графена имеют разрывный характер, длина их меньше размера ячейки, ориентация слоев произвольная.

Третья – низкая: четко выраженные слои графена отсутствуют, могут наблюдаться отдельные точечные участки, выраженная ориентация отсутствует.

Обработка проводилась двумя способами – ручным и машинным.

Для наглядности дальнейшего рассмотрения выделим фрагмент карты, отмеченный рамкой на рис. 1, и покажем процедуру обработки каждым способом в отдельности.

## 2. Ручная обработка карт

Для ручной обработки использовалась карта с наложенной на нее сеткой, как это показано на рис. 1в.

Схема проведения ручной обработки карт иллюстрируется рис. 2.

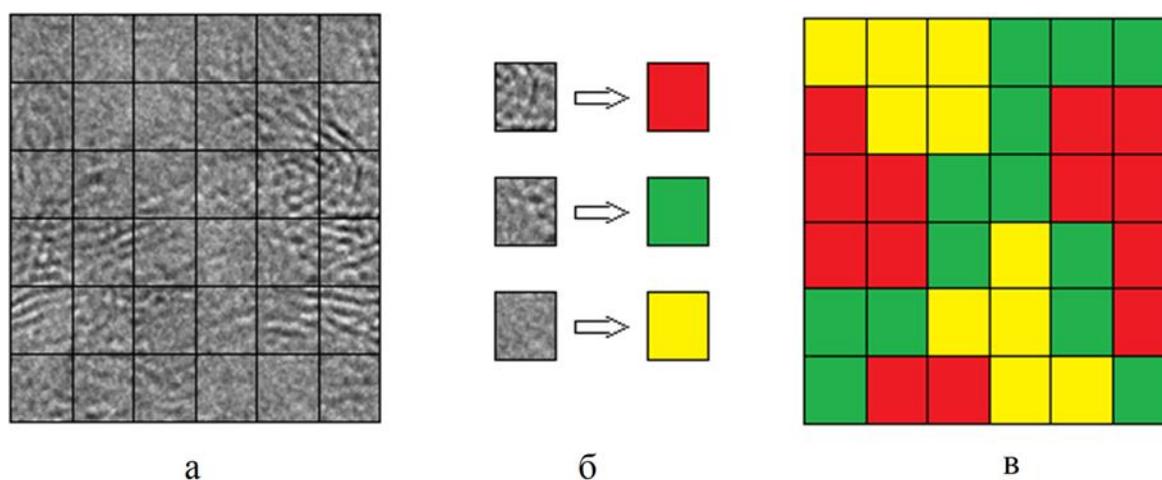


Рис. 2. Схема проведения ручной обработки карты.

а – исходная карта; б – схема соответствия между структурой ячейки и цветом; в – карта с выполненной цветовой дискретизацией.

После того, как карта была разбита на ячейки, задача состояла в том, чтобы определить степень упорядоченности слоев графена в каждой ячейке по отдельности. Для такого анализа были введены три степени порядка, показанные на рис.2б. В зависимости от степени упорядоченности структуры внутри ячейки, соответствующая ячейка окрашивалась тем или иным цветом. Так, наиболее упорядоченные ячейки, где слои графена были выражены четко

и в большинстве протягивались от одного края ячейки до другого, такие ячейки окрашивались красным цветом. Если слои графена были выражены плохо и имели разрывной характер, то такая ячейка окрашивалась зеленым цветом. Если слои графена в пределах ячейки почти не просматривались, и ячейка имела более или менее однородный вид, то такие ячейки окрашивались желтым цветом.

Таким образом, в процессе дискретизации карты ячейки сетки приобретали цвет путем визуального анализа. Для повышения объективности исследования в процессе работы на карту накладывалась непрозрачная подвижная маска с единственным окном, соответствующим размеру одной ячейки. Применение маски было вызвано необходимостью исключения мешающего влияния соседних ячеек на визуальный анализ рассматриваемой ячейки. Так что в данный момент времени рассматривалась только одна ячейка сетки. В процессе дискретизации маска перемещалась по карте по строкам сверху вниз и слева направо, осуществляя полную развертку всей площади карты. При этом окно маски последовательными шагами совмещалось с контуром соответствующей ячейки. Для записи результатов использовалась дополнительная сетка, ячейки которой сначала были свободны. После определения степени однородности выбранной ячейки карты соответствующая ячейка свободной сетки отмечалась цветом, как это показано на рис. 2б, в результате чего карта принимала разноцветный вид, показанный на рис. 2в.

Таким образом, в результате дискретизации исходная карта с кажущимся беспорядочным рисунком заменялась на карту, в которой области, соответствующие различной степени упорядоченности структуры, были выделены полностью четким образом, доступным для численного анализа.

### **3. Машинная обработка карт**

Для проведения машинной обработки карты надо было сначала привести ее к виду, удобному для машинного анализа, после чего выполнить цветовую дискретизацию, подобную проведенной при ручной обработке.

Первый этап обработки изображения карты шунгита состоял в переводе изображения в формат оттенков серого, чтобы значение каждого пикселя изображения характеризовалось числом в пределах от 0 до 255.

Для дальнейшей обработки использовалось свободное программное обеспечение Gwyddion, что позволило осуществить вычитание фона (инструмент Remove polynomial background), в результате чего рисунок стал более однородным и менее контрастным, что позволило увеличить точность работы последующих этапов алгоритма.

В качестве следующего этапа была обработка изображения на языке Python. Изображение карты разбивалось на фрагменты сеткой 20x20 ячеек (подобно рис. 1), размер ячейки 60x60 пикселей, что соответствует физическому размеру области образца 2x2 нм, и для каждой ячейки вычислялось значение структурной энтропии по отдельности.

Для подсчета структурной энтропии были использованы значения составляющих ячейку пикселей. Алгоритм вычислял гистограмму, содержащую относительное количество пикселей  $P_i$  для всех имеющихся значений яркости  $i$ . По данным гистограммы выполнялось вычисление структурной энтропии по формуле Шеннона [45, стр.471, форм. (18.2.2)]:

$$H = - \sum_i P_i \log_2 P_i. \quad (1)$$

Для вычисления использовались готовые функции языка Python, входящие в библиотеку skimage, предназначенную для анализа изображений. Полученные значения энтропии сохранялись в матрице размером 20x20 по числу фрагментов исходного изображения. Для дальнейшего анализа значения матрицы были нормализованы, то есть приведены к диапазону чисел от 0 до 1.

Для оценки упорядоченности структуры в отдельно взятом фрагменте анализировалось соответствующее значение энтропии. В случае, если фрагмент не содержал структурных элементов, его текстура визуально определялась как однородная, шумовая, в среднем по яркости серая. Это означало,

что гистограмма такого фрагмента не имела выраженных пиков, так что относительные количества пикселей  $P_i$  были равномерно малы, следовательно значение энтропии также было мало. Напротив, при наличии четко выраженных структурных элементов во фрагменте на гистограмме были проявлены пики с яркостью, близкой к 0 или 255, что давало высокое значение энтропии.

Задавая некоторые пороговые значения энтропии, можно было выделить фрагменты, которые с высокой степенью вероятности содержали вполне определенные структурные элементы шунгита.

В настоящей работе использовались три интервала пороговых значений энтропии: первый 0-30%, второй 30%- 60% и третий 60%-100% от максимального значения энтропии по всей карте. Значения энтропии в ячейках, попавшие в первый интервал, были округлены до 0 (структура изображения почти однородная, четко выраженные слои графена отсутствуют), во втором интервале была приведена к 0,5 (имеются разорванные куски слоев графена, перемежающиеся серыми участками), в третьем энтропия была приведена к 1 (слои графена формируются в более или менее упорядоченные пачки).

Реализация приведенной схемы машинной обработки карт иллюстрируется рис. 3.

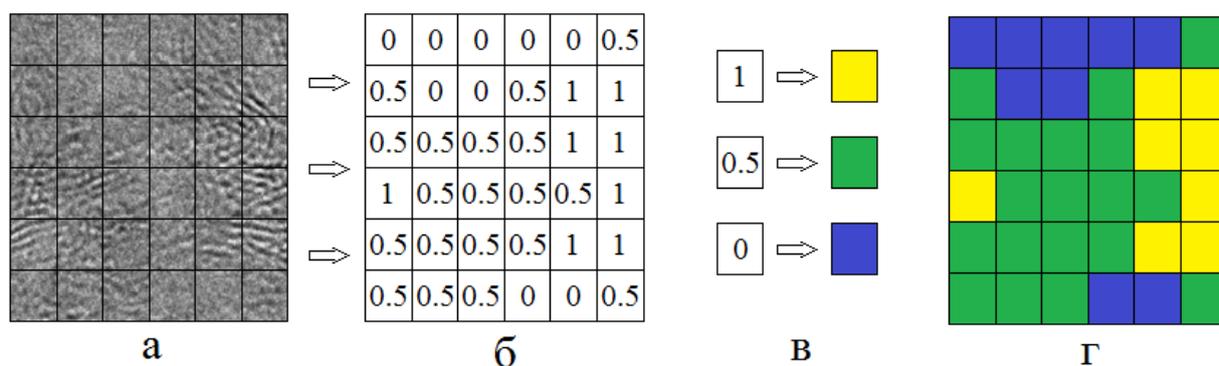


Рис. 3. Схема проведения машинной обработки карты.

а – исходная карта; б – карта со значениями энтропии в каждой ячейке;

в – схема соответствия между энтропией ячейки и ее цветом;

г – карта с выполненной цветовой дискретизацией.

На рис. 3а показана исходная карта, на которую наложена сетка, формирующая отдельные ячейки. На рис. 3б внутри каждой ячейки показаны значения энтропии, определенные описанным выше способом. На рис. 3в приведена схема установления соответствия между значениями энтропии и цветами соответствующих ячеек, а на рис. 3г приведена карта, полученная в результате выполненной цветной дискретизации.

Таким образом, в результате дискретизации исходная карта с кажущимся беспорядочным рисунком заменялась на карту, в которой области, соответствующие различному уровню энтропии, были выделены четким образом, доступным для численного анализа.

#### **4. Замечание об определении понятия энтропии**

В терминологическом отношении имеет место разночтение, касающееся выражения «энтропия», способное породить некоторую путаницу. Так, в статистической физике, согласно Больцману [46, стр.429, форм.(25.4)], энтропия понимается как логарифм числа возможных состояний системы, то есть для хорошо упорядоченной структуры энтропия мала, а для разупорядоченной велика. То есть для серых участков изображения энтропия Больцмана велика, а для четких слоев графена – мала. Таким образом, при использовании термина «энтропия» следует учитывать, относится ли он к статистической физике и тогда надо говорить «энтропия по Больцману», или к теории информации и тогда надо говорить «энтропия по Шеннону». В рамках настоящей работы используется понятие энтропии по Шеннону (формула (1)), которая связывается с неопределенностью состояния некоторого источника информации. Если источник выдает предсказуемые значения (в нашем случае – шумовой фоновый сигнал участка карты без проявленных структурных элементов, укладывающийся в узкий диапазон значений), то неопределенность знания некоторого получателя сообщения относительно состояния источника (энтропия) будет мала. Тогда, если источник может выдать значения в широком интервале (в нашем случае от 0 до 255 при наличии на участке карты структурных элементов), то его «непредсказуемость» (то есть, опять же энтропия

по Шеннону) будет иметь более высокое значения, то есть энтропия будет велика.

## 5. Сравнение результатов ручной и машинной обработки

В предыдущих разделах приведены два способа обработки карт, касающиеся степени упорядоченности структуры. Поскольку объект исследования является единым и исследуется одна и та же характеристика, то можно ожидать, что оба способа должны дать одинаковые или хотя бы близкие результаты. Рассмотрим соотношение между результатами, получаемыми обоими методами.

На рис. 2в приведена карта, структурная дискретизация которой выполнена ручным методом, а на рис. 3г – карта, структурная дискретизация которой выполнена с применением машинного алгоритма. В то же время цвета ячеек, используемые тем и другим методами для обозначения одинаковой степени упорядоченности между собой различаются. Чтобы привести цвета к единству, выполним замену цветов для карты, обработанной ручным способом, в соответствии со схемой, приведенной на рис. 4.

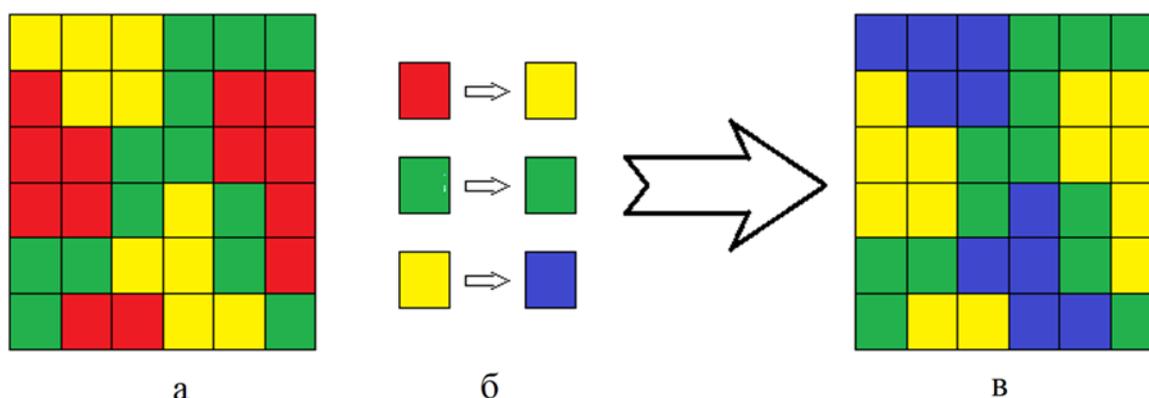


Рис. 4. Схема замены цветов на карте, обработанной ручным способом. а – исходная карта (совпадает с рис. 2в); б – схема замены цветов ячеек; в – карта, полученная в результате замены цветов.

Так, на исходной карте (рис. 4а), следуя рис. 4в, красный цвет заменяется на желтый, зеленый остается прежним, желтый заменяется на синий. В результате

на рис. 4в получается та же карта ручной обработки, но цвета которой совпадают с цветами машинной обработки.

Сравним теперь обе карты, ручную и машинную, цвета которых приведены к единству, то есть желтый цвет соответствует высокой упорядоченности, зеленый – средней, синий – низкой.

На рис. 5а приведена карта ручной обработки на рис. 5б – карта машинной обработки, а на рис. 5в – результаты соответствия цветов обеих карт. Так, для ячеек, цвета которых на рис. 5а и рис. 5б совпадают, на рис. 5в ячейки оставлены в совпадающем цвете. Для ячеек, цвета которых на рис. 5а и рис. 5б различаются, цвет оставлен белым и отсутствие совпадения обозначено нулем.

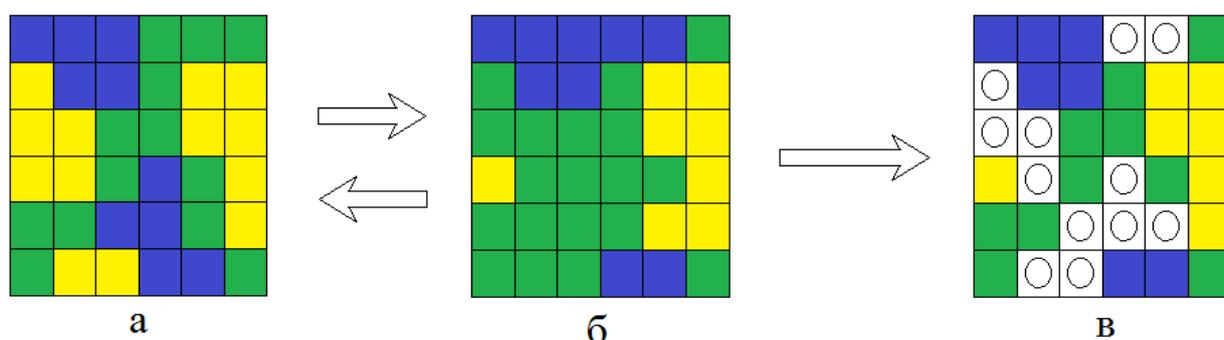


Рис.5. Сравнение карт ручной и машинной обработки.  
 а – карта ручной обработки (совпадает с рис. 4в);  
 б – карта машинной обработки (совпадает с рис. 3г);  
 в – степень соответствия цветов ячеек обеих карт.

Этот рисунок позволяет сравнить результаты ручной и машинной обработки. Данные, полученные из рассмотрения рис.5, сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Сравнение цветов ячеек при различных видах обработки.

Цвета Ячеек	Ручная обработка	Машинная обработка	Совпадение	Отсутствие совпадения
Желтый	13 → 36%	8 → 22%	7 → 19%	12 → 33%
Зеленый	13 → 36%	19 → 53%	10 → 28%	
Синий	10 → 28%	9 → 25%	7 → 19%	
Сумма	36 → 100%	36 → 100%	34 → 67%	12 → 33%

В первом столбце таблицы приведены цвета ячеек. Желтый цвет соответствует высокой степени упорядоченности, зеленый – средней, синий – низкой. Во втором столбце таблицы приведены данные ручной обработки – приведено количество ячеек того или иного цвета с соответствующим процентным отношением к общему числу ячеек. В третьем столбце таблицы – аналогичные данные при машинной обработке. В четвертом столбце приведены количества совпадений по каждому из цветов, соответствующие рис. 5в, а в пятом столбце – количество ячеек, где совпадение отсутствует (нули на рис. 5в).

Из таблицы видно, что в общем совпадение между методами составляет 67%, а отсутствие совпадений – 33%. При этом наилучшее совпадение имеет место по зеленым ячейкам, соответствующим средней степени упорядоченности – 28%, что в полтора раза выше, чем совпадение по высокой и низкой степени упорядоченности, составляющей всего 19%.

## **6. Сравнение результатов обработки на полной карте**

Выполненное в предыдущем разделе сравнение результатов ручной и машинной обработки выполнено на небольшом фрагменте карты размером 6х6 ячеек, что можно считать частичным результатом. Выполним теперь такое же сравнение на полной карте размером 20х20 ячеек. Воспользуемся картой, представленной на рис. 1.

## **7. Ручная обработка на полной карте**

Карта, полученная в результате ручной обработки в соответствии с процедурой, описанной в разделе 2, показана на рис. 6.

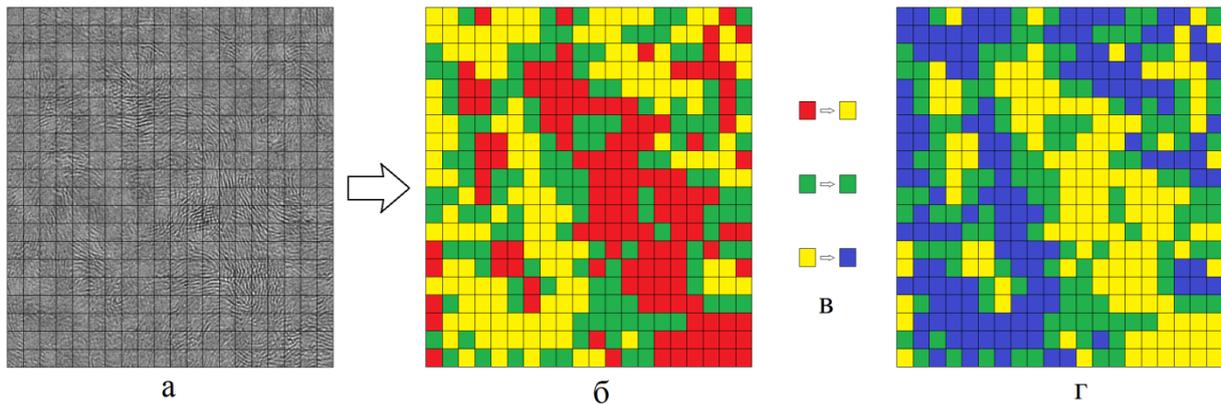


Рис. 6. Полная карта с дискретизацией, выполненной ручным способом.  
 а – исходная карта; б – карта, дискретизированная ручным способом;  
 в – схема замены цветов ячеек;  
 г – та же карта, полученная в результате замены цветов.

### 8. Машинная обработка на полной карте

Карта, полученная в результате машинной обработки в соответствии с процедурой, описанной в разделе 3, показана на рис. 7.

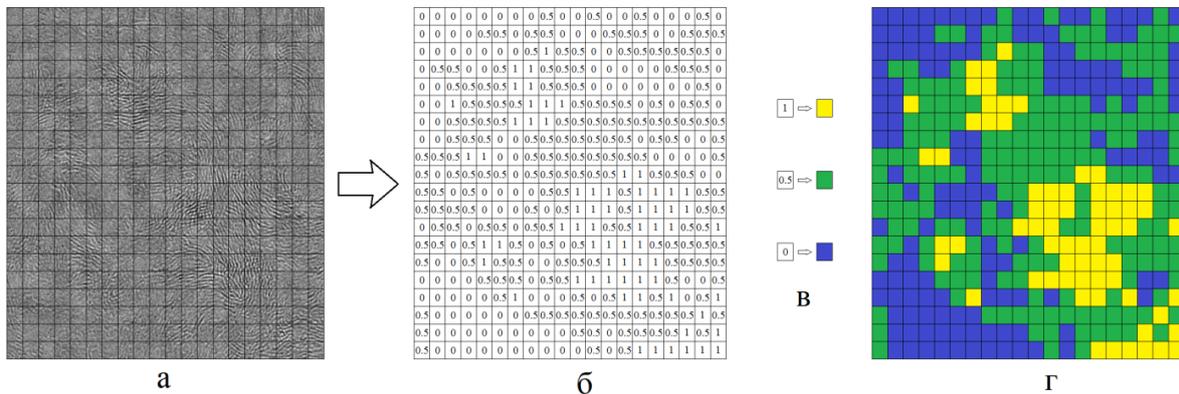


Рис. 7. Полная карта с дискретизацией, выполненной машинным способом.  
 а – исходная карта; б – карта со значениями энтропии в каждой ячейке;  
 в – схема соответствия между энтропией ячейки и ее цветом;  
 г – карта с выполненной цветовой дискретизацией.

### 9. Сравнение результатов ручной и машинной обработки

На рис. 8 приведены карты, структурная дискретизация которых выполнена ручным методом (а) и машинным методом (б). Цвета ячеек приведены к единству.

На рис. 8в приведена карта, полученная в результате сравнения обеих карт. Цвета ячеек, совпадающие на обеих картах, отмечены тем же цветом, Ячейки, в которых соответствие отсутствует, оставлены бесцветными и отмечены нулем.

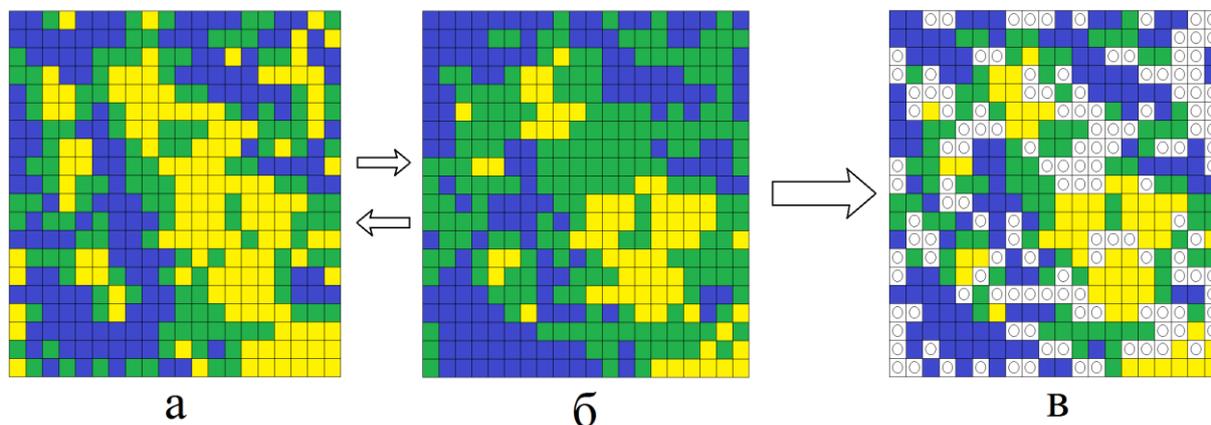


Рис. 8. Сравнение карт ручной и машинной обработки.  
 а – карта ручной обработки (совпадает с рис. 6г);  
 б – карта машинной обработки (совпадает с рис. 7г);  
 в – степень соответствия цветов ячеек обеих карт.

В таблице 2 приведены результаты сравнения карт. Структура таблицы совпадает со структурой таблицы 1, приведенной в разделе 5.

Таблица 2. Сравнение цветов ячеек при различных видах обработки.

Цвета Ячеек	Ручная обработка	Машинная обработка	Совпадение	Отсутствие совпадения
Желтый	130 → 32%	68 → 17%	60 → 15%	138 → 34%
Зеленый	134 → 34%	190 → 48%	94 → 24%	
Синий	136 → 34%	142 → 35%	108 → 27%	
			138 → 34%	
Сумма	400 → 100%	400 → 100%	400 → 67%	138 → 34%

Из таблицы видно, что наилучшее соответствие имеет место для ячеек синего цвета (27%), несколько хуже для ячеек зеленого цвета (24%) и еще хуже для ячеек желтого цвета (15%). Совпадение отсутствует в 34% ячеек, так что полное совпадение имеет место для 66% ячеек.

Из сравнения с аналогичными цифрами для фрагмента карты (раздел 5) можно видеть, что соответствие по высокой степени упорядоченности довольно близкое – по фрагменту – 19%, по полной карте – 15%. По средней упорядоченности тоже довольно близкое – по фрагменту – 28%, по полной карте – 24%. Несколько хуже соответствие по низкой упорядоченности – по фрагменту – 19%, по полной карте – 27%.

Общее соответствие по фрагменту составляет 67%, а по полной карте – 66%, то есть отличается всего на 1.49%, что можно считать довольно высоким.

В остальных случаях степень соответствия по высокой упорядоченности – 11, 2%, по средней – 7,7 %, по низкой – 17,4%.

**Замечание.** Из рассмотрения второго и третьего столбцов таблиц 1 и 2 можно видеть, что в обоих случаях (по фрагменту и по полной карте) значения для разных степеней упорядоченности при ручной обработке (второй столбец) отличаются между собой меньше, чем при машинной обработке (третий столбец). Так, при ручной обработке для полной карты (таблица 2) имеем 32%, 34% и 34%, а при машинной обработке 17%, 48% и 35%. Подобные же соотношения можно видеть и из таблицы 1. В то же время, согласно работе [42, разделы 10-12 ] степень достоверности ручной обработки составляет 69%, то есть, например, 32% при ручной обработке могут варьироваться от 22% до 46%, так что отмеченное различие между значениями при ручной и машинной обработке находится в пределах допустимой точности. Следует, однако, заметить, что такая точность достигается на пределах сравнения результатов, поэтому отмеченное различие может явиться предметом для более подробного рассмотрения.

## 10. Рекомендации для дальнейших исследований

Главным результатом проделанного исследования можно считать построение машинного алгоритма, позволяющего поучить структурные характеристики шунгита по данным высокоразрешающей электронной микроскопии.

Сопоставление результатов работы алгоритма с данными ручного метода, показывающее хорошее совпадение, дает основания полагать о достаточной объективности получаемых результатов.

Важнейшим преимуществом использования предложенного алгоритма в сравнении с ручным методом является значительное снижение трудоемкости и уменьшение времени обработки исходных материалов.

В качестве рекомендации для дальнейших исследований можно указать исследование различных фрагментов карты с последующим сравнением результатов от различных фрагментов, что обеспечит более объективные данные о степени однородности карты в целом.

Аналогичную проверку можно провести по нескольким картам, снятым на различных участках одного образца, что позволит получить данные о степени однородности образца в целом. Сравнение результатов по нескольким образцам, в том числе сопоставление с электрической проводимостью образца, позволит выявить ряд параметров шунгита, важных для практических применений.

Следует дополнительно заметить, что для определения свойств текстур и сегментации изображений помимо энтропии можно также использовать другие величины. Для этих целей часто используются текстурные признаки Харалика (Haralick), представляющие собой набор статистических мер, вычисляемых на основе матрицы совместной встречаемости градаций серого (GLCM, Gray-Level Co-occurrence Matrix). Например, при определении участков, свободных от структурных элементов можно использовать такой признак как гомогенность, определяемый как среднее матрицы GLCM, вычисляемой с помощью входящей в библиотеку `skimage` функции `graycorners`. Гомогенность может быть использована как фильтр для отбраковки участков изображения, не содержащих структурные элементы с целью ускорения работы прочих частей алгоритма, предназначенных для идентификации пачек, лент и т.д.

Альтернативой функции структурной энтропии может служить контраст участка изображения, вычисляемый как разница между значениями самого яркого и самого темного пикселей. Чем выше значение контраста, тем больший

разброс значений пикселей имеется в ячейке карты, что в нашем случае соответствует наличию структурных элементов. Можно полагать, что совместное использование нескольких признаков наличия и отсутствия структуры позволит наиболее тонко настроить чувствительность метода к выделению ячеек, имеющих в своем составе характерные фрагменты структурных образований шунгита.

## **Заключение**

Основные результаты настоящей работы сводятся к следующему.

1) Приведен краткий обзор общих характеристик графеносодержащего высокоуглеродистого шунгита как материала для создания экранов для электромагнитного излучения. Отмечено, что проводящие свойства, определяющие экранирующую способность, в значительной степени зависят от структуры и распределения графеновых слоев внутри материала. В качестве важнейшего инструмента, позволяющего исследовать структуру шунгита на наноуровне отмечена растровая электронная микроскопия. Рассмотрение полученных этим методом карт распределения углерода с помощью структурной дискретизации по трем уровням позволяет оценить проводимость шунгита по данным его структуры. Отмечена высокая трудоемкость ручного анализа дискретизированных карт в сочетании с недостаточной точностью, обусловленной физиологическими особенностями зрения, в связи с чем поставлена задача разработки способа машинного анализа структуры карт с применением алгоритма оценки энтропии ячеек дискретизированной карты по трем уровням. С целью сопоставления с предыдущими работами поставлена задача сравнения результатов ручной визуальной дискретизации с машинной.

2) Приведены общие характеристики исследуемых образцов шунгита и методики получения карт методом растровой электронной микроскопии. Подробно рассмотрена методика дискретизации, в первую очередь касающаяся выбора оптимальных для надежных результатов размеров карты в целом, размеров отдельной ячейки сетки дискретизации и полного количества ячеек

дискретизированной карты. В качестве опорного эталона для выбора параметров дискретизации выбраны размеры слоев графена и промежутков между ними, а также типичный размер отдельной графеновой пачки, являющейся типичным структурным элементом шунгита. Оптимальным принят размер карты 40x40 нм, при этом сетка дискретизации содержит 20 на 20, то есть 400 ячеек размером 2x2 нм.

3) В качестве следующего этапа обработки карты после дискретизации предложен анализ оценки степени однородности то есть упорядоченности слоев графена в каждой ячейке по отдельности. Отмечены три градации однородности в пределах одной ячейки: высокая, когда слои графена почти непрерывны, параллельны друг другу и проходят через всю или значительную часть ячейки без разрывов, средняя, когда слои графена имеют разрывный характер, длина их меньше размера ячейки, низкая, когда четко выраженные слои графена отсутствуют. Для предварительного более наглядного описания методики анализа карты, первичное рассмотрение было выполнено на основе фрагмента полной карты размером 6 на 6 ячеек. В пределах фрагмента выполнена ручная и машинная обработка степени упорядоченности структуры.

4) При ручной обработке на карту накладывалась маска с окном в одну ячейку, в пределах которой визуальным способом отмечалась степень упорядоченности слоев графена в пределах данной ячейки. В зависимости от степени упорядоченности структуры внутри ячейки, соответствующая ячейка окрашивалась тем или иным цветом: при высокой степени порядка – красным, при средней – зеленым, при низкой – желтым. Маска перемещалась по строкам и столбцам карты, в результате чего карта принимала разноцветный вид из клеток разных цветов, соответствующих порядку в каждой клетке. Таким образом, в результате дискретизации исходная карта с кажущимся беспорядочным рисунком заменялась на карту, в которой области, соответствующие различной степени упорядоченности структуры, были выделены полностью четким образом, доступным для численного анализа.

5) При машинной обработке карта сначала приводилась к виду, удобному для машинного анализа, после чего выполнялась цветовая дискретизация, подобная проведенной при ручной обработке. Первый этап машинной обработки состоял в переводе изображения карты в формат оттенков серого, чтобы значение каждого пикселя изображения характеризовалось числом в пределах от 0 до 255. Для дальнейшей обработки использовалось свободное программное обеспечение Gwyddion, чтобы сделать рисунок структуры карты более однородным и менее контрастным. В качестве следующего этапа была обработка изображения на языке Python. Изображение карты разбивалось сеткой 20x20 ячеек, каждая размером 60x60 пикселей, после чего для каждой ячейки по отдельности вычислялось значение структурной энтропии в соответствии с формулой Шеннона, для чего использовались функции языка Python, входящие в библиотеку skimage. Использовались три интервала пороговых значений энтропии: первый 0-30%, второй 30%-60% и третий 60%-100% от максимального значения энтропии по всей карте. При таких значениях энтропии ячейки окрашивались в соответствующие цвета, так что карта принимала разноцветный вид из клеток разных цветов, соответствующих значению энтропии в каждой клетке. Таким образом, в результате дискретизации исходная карта с кажущимся беспорядочным рисунком заменялась на карту, в которой области, соответствующие различному уровню энтропии, были выделены четким образом, доступным для численного анализа.

б) Выполнено сравнение результатов ручной и машинной обработки. Цветные карты, полученные обоими способами, были приведены в геометрическое соответствие по расположению ячеек и их цветам. Отмечалось совпадение или различие цветов соответствующих друг другу ячеек при обоих способах обработки. Результаты, полученные на фрагменте карты, были обобщены на полную карту. Рассматривалось соответствие по фрагменту и по полной карте. Было установлено, что в общем совпадение между методами составляет 67%, а отсутствие совпадений – 33%. При этом наилучшее совпадение имеет место по средней степени упорядоченности (26%), что заметно

выше, чем совпадение по высокой (17%) и низкой (23%) степеням упорядоченности. На основе полученных результатов был сделан вывод о высокой степени эффективности замены ручной обработки машинной.

7) Приведены некоторые рекомендации для дальнейшего развития работы, в том числе сравнение различных фрагментов отдельной карты и сравнение нескольких карт одного образца между собой, что может позволить оценить степень однородности образца в целом. Сравнение результатов для различных образцов может дать возможность оценить степень однородности образцов между собой, а также, при сопоставлении с данными по проводимости, оценить степень влияния структуры образца на электрическую проводимость шунгита, определяющую его экранирующие свойства. Приведены некоторые соображения, касающиеся развития методики машинной алгоритмизации исследования структуры шунгита, в том числе оценка сравнительных градаций серого цвета на картах, а также использования разности между крайними значениями пикселей в пределах каждой отдельной ячейки карты.

**Финансирование:** Исследование выполнено в рамках госзадания ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина» № 075-03-2024-162 по теме «Влияние структуры на статические и динамические электропроводящие свойства разупорядоченного углерода», а также в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

### Литература

1. Соколов В.А., Калинин Ю.К., Дюккиев Е.Ф. (ред.). Шунгиты – новое углеродистое сырье. Петрозаводск: Карелия. 1984.
2. Melezhik V.A., Filippov M.M., Romashkin A.E. A giant paleoproterozoic deposit of shungite in NW Russia. // Ore Geology Reviews. 2004. V.24. P.135-154.
3. Борисов П.А. Карельские шунгиты. Петрозаводск: Карелия. 1956.
4. Филиппов М.М. Шунгитоносные породы Онежской структуры. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. 2002.

5. Филиппов М.М., Медведев П.П., Ромашкин А.Е. О природе шунгитов Южной Карелии. // Литология и полезные ископаемые. 1998. №3. С.323-332.
6. Голубев Е.А., Антонец И.В., Щеглов В.И. Модельные представления микроструктуры, электропроводящих и СВЧ-свойств шунгитов. Сыктывкар: Изд.СыктГУ. 2017.
7. Родионов В.В. Механизмы взаимодействия СВЧ-излучения с наноструктурированными углеродсодержащими материалами. Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Курск. 2014.
8. Мошников И.А., Ковалевский В.В., Лазарева Т.Н., Петров А.В. Использование шунгитовых пород в создании радиоэкранирующих композиционных материалов. // Материалы совещания «Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минерагения северо-запада России. Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН. 2007. С.272-274.
9. Лыньков Л.М., Махмуд М.Ш., Криштопова Е.А. Экраны электромагнитного излучения на основе порошкообразного шунгита. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. Новополоцк: ПГУ. 2012. №4. С.103-108.
10. Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Криштопова Е.А. Радиопоглощающие свойства никельсодержащего порошкообразного шунгита. // ПЖТФ. 2009. Т.35. №9. С.44-48.
11. Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Криштопова Е.А. Микроволновые и оптические свойства многофункциональных экранов электромагнитного излучения на основе порошкообразного шунгита. // Сборник трудов. 4-й международной конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». Беларусь. Минск. 2009. С.23-25.
12. Emelyanov S.G., Kuzmenko A.P., Rodionov V.V., Dobromyslov M.B. Mechanisms of microwave absorption in carbon compounds from shungite. // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2013. V.5. №4. P.04023-1 04023-3.

13. Кузьменко А.П., Родионов В.В., Харсеев В.А. Гиперфуллереновые углеродные нанообразования как порошковый наполнитель для поглощения СВЧ-излучения. // Нанотехника. 2013. №4. Выпуск 36. С.35-36.
14. Kuzmenko A.P., Rodionov V.V., Emelyanov S.G., Chervyakov L.M., Dobromyslov M.V. Microwave properties of carbon nanotubes grown by pyrolysis of ethanol on nickel catalyst. // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2014. V.6. №3. P.03037-1 03037-2.
15. Бойправ О.В., Айад Х.А.Э., Лыньков Л.М. Радиоэкранирующие свойства никельсодержащего активированного угля. // ПЖТФ. 2019. Т.45. №12. С.52-54. <https://doi.org/10.219883/PJTF.2019.12.47921.17225>
16. Савенков Г.Г., Морозов В.А., Украинцева Т.В., Кац В.М., Зегря Г.Г., Илюшин М.А. Влияние добавок шунгита на электрический пробой перхлората аммония. // ПЖТФ. 2019. Т.45. №19. С.44-46. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2019.19.48318.17847>
17. Golubev Ye.A., Antonets I.V., Shcheglov V.I. Static and dynamic conductivity of nanostructured carbonaceous shungite geomaterials. // Materials Chemistry and Physics. 2019. V. 226. №3. P.195-203.
18. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Динамическая проводимость графеносодержащего шунгита в диапазоне сверхвысоких частот. // ПЖТФ. 2018. Т.44. №9. С.12-18. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2018.09.46060.16883>
19. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Исследование проводимости графеносодержащего шунгита волноводным методом. // Сборник трудов Международного симпозиума «Перспективные материалы и технологии». Витебск: Беларусь. 2017. С.6-9.
20. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Динамическая проводимость графеносодержащего шунгита в диапазоне сверхвысоких частот. // Сборник трудов конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах». Институт физики Дагестанского научного центра РАН. Махачкала. 2017. С.432-436.

21. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Динамическая проводимость графеносодержащего шунгита в диапазоне сверхвысоких частот. // Сборник трудов XXV Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы». М.: НИУ МЭИ. 2017. С.135-147.
22. Морозов С.В., Новоселов К.С., Гейм А.К. Электронный транспорт в графене. // УФН. 2008. Т.178. №7. С.776-780.  
<https://doi.org/10.3367/UFNr.01788.2000807i.0776>
23. Hill E.W., Geim A.K., Novoselov K., Schedin F., Blake P. Graphene spin valve devices. // IEEE Trans. Magn. 2006. V.42. №10. P.2694-2696.
24. Голованов О.А., Макеева Г.С., Ринкевич А.Б. Взаимодействие электромагнитных волн с периодическими решетками микро- и нанолент графена в терагерцовом диапазоне. // ЖТФ. 2016. Т.86. №2. С.119-126.
25. Макеева Г.С., Голованов О.А. Математическое моделирование электронноуправляемых устройств терагерцового диапазона на основе графена и углеродных нанотрубок. Пенза: Изд. ПГУ. 2018.
26. Castro Neto A.H., Guinea F., Peres N.M.R., Novoselov K.S., Geim A.K. The electronic properties of graphene. Rev.Mod.Phys. 2009. V.81. №1. P.109-162(54).
27. Ковалевский В.В. Структура углеродного вещества и генезис шунгитовых пород. // Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Петрозаводск. 2007.
28. Шека Е.Ф., Голубев Е.А. О техническом графене – восстановленном оксиде графена – и его природном аналоге – шунгите. // ЖТФ. 2016. Т.86. №7. С.74-80.
29. Голубев Е.А., Уляшев В.В., Велигжанин А.А. Пористость и структурные параметры шунгитов Карелии по данным малоуглового рассеяния синхротронного излучения и микроскопии. // Кристаллография. 2016. Т.61. №1. С.74-85.
30. Гоулдстейн Д., Яковиц Х. (ред.). Практическая растровая электронная микроскопия. М.: Наука. 1978.

31. Стоянов П.А. Электронный микроскоп. // Физическая энциклопедия. Т5. М.: Большая Российская энциклопедия. 1998. Стр.574-578.
32. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Представление удельной проводимости графеносодержащего шунгита на основе модели трубок тока. // Электронный «Журнал радиоэлектроники». 2020. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.3.7>
33. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Применение метода блочной дискретизации для анализа электрической проводимости графеносодержащего шунгита. // Электронный «Журнал радиоэлектроники». 2021. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.3.3>
34. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Определение электрической проводимости графеносодержащего шунгита с использованием высокоразрешающей растровой электронной микроскопии. // Электронный «Журнал радиоэлектроники». 2021. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.3.9>
35. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Применение метода декомпозиции для расчета проводимости шунгита на основе электронно-микроскопических карт распределения углерода. // Электронный «Журнал радиоэлектроники». 2021. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.3.13>.
36. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Применение метода независимых каналов для определения электрической проводимости графеносодержащего шунгита. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.6>.
37. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Влияние структуры углеродной составляющей графеносодержащего шунгита на его электрическую проводимость. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.18>.

38. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Применение метода тринарной дискретизации для анализа структурного распределения углерода в графеносодержащем шунгите. // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). 2023. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.17>.
39. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Исследование структурных и электрических свойств графеносодержащего шунгита по данным электросиловой спектроскопии. Часть 1. Концентрация углерода. // Электронный «Журнал радиоэлектроники», 2018, №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.8.5>.
40. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Исследование структурных и электрических свойств графеносодержащего шунгита по данным электросиловой спектроскопии. Часть 2. Дискретность структуры. // Электронный «Журнал радиоэлектроники», 2018, №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.8.6>
41. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Исследование структурных и электрических свойств графеносодержащего шунгита по данным электросиловой спектроскопии. Часть 3. Удельная проводимость. // Электронный «Журнал радиоэлектроники», 2018, №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.9.1>.
42. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Применение метода трехуровневой дискретизации для анализа связи между структурой и удельной проводимостью графеносодержащего шунгита. Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). 2023. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.18>
43. Antonets I.V., Golubev Ye.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. V.31. №10. P.961-970. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2023.2226273>.

44. Antonets I.V., Golubev Ye.A., Shcheglov V.I. Application of the trinary discretization method for the structural analysis of natural disordered sp<sup>2</sup> carbon. // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2024. V.32. №3. P.246-253. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2023.2273416>.
45. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука. 1964.
46. Левич В.Г. Курс теоретической физики. Т.1. М.: Наука. 1969.

**Для цитирования:**

Антонец И.В., Устюгов В.А., Щеглов В.И. Алгоритмизация исследования структуры графеносодержащего шунгита по данным растровой электронной микроскопии. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.7.13>