

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.4.9>

УДК: 537.874; 537.624

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ТРЕХСТУПЕНЧАТОЙ РЕЗИСТИВНОЙ СЕТКИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ГРАФЕНОСОДЕРЖАЩЕГО ШУНГИТА ПО ДАННЫМ РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

И.В. Антоненц¹, Е.А. Голубев², В.И. Щеглов³

¹ Сыктывкарский государственный университет им. П.Сорокина,
167001, Сыктывкар, Октябрьский пр-т, 55

² Институт геологии им. Н.П.Юшкина Коми НЦ Уро РАН,
167982, Сыктывкар, ул. Первомайская, 54

³ Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая, 11-7

Статья поступила в редакцию 17 марта 2026 г.

Аннотация. Рассмотрена возможность применения метода трехступенчатой резистивной сетки для анализа проводимости графеносодержащего шунгита по данным растровой электронной микроскопии. Для локальной характеристики распределения углерода на карте, полученной методом электронной микроскопии, предложено использовать структурную дискретизацию такой карты. Приведены два метода определения структуры ячеек дискретизированной карты – ручной и машинный. Было установлено, что степень соответствия между результатами ручной и машинной обработки составляет около 57 %. Для оценки электрических параметров карты было предложено использование метода трехступенчатой резистивной сетки. Приведена схема построения резистивной сетки и последующего ее сворачивания с помощью алгоритма Франка-Лобба. Для применения метода резистивной сетки исходная полная карта была разделена на четыре частичных карты с последующей их оцифровкой. Из

сравнения сопротивлений частичных карт было установлено, что соответствие между ручной и машинной обработками составляет около 70 %. Приведены некоторые рекомендации о возможном развитии работы.

Ключевые слова: графеносодержащий шунгит, электронная микроскопия, резистивная сетка.

Финансирование: Экспериментальное 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», карты структурных элементов ЭСМ и ВРЭМ получены в рамках НИР Института геологии им. Н.П.Юшкина ФИЦ Коми НЦ Уро РАН, теоретическая и статистическая обработка результатов проведена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им.В.А. Котельникова РАН.

Автор для переписки: Щеглов Владимир Игнатьевич, vshcheg@cplire.ru

Введение

Шунгит представляет собой докембрийскую углеродосодержащую горную породу, сходную с каменным углем, образовавшуюся на основе нефти из приполярных морских водорослей [1,2]. Наиболее мощные залежи шунгита находятся в северных областях Российской Федерации, таких как Карельский перешеек и Новая Земля [2-5].

Традиционным применением шунгита является использование его в качестве топлива, однако значительная электрическая проводимость углерода обеспечивает возможность создания крайне дешевых и в то же время высокоэффективных электрических экранов, надежно поглощающих электромагнитное излучение в широком диапазоне частот [6-21].

Наибольший интерес для создания экранов представляет высокоуглеродистый шунгит с содержанием углерода более 80 %. При этом углеродная составляющая сформирована в виде слоев графена [22-27] различной ориентации, образующих пачки, ленты и глобулы [28-30].

Проводимость шунгита в целом зависит от пространственной структуры распределения слоев графена на наноуровне. Для исследования такой структуры шунгита весьма удобен метод высокоразрешающей растровой электронной микроскопии [31,32].

В работах [33-41] выявлена связь между структурой распределения углерода и электрическими параметрами шунгита, а также предложен ряд методов определения его удельной проводимости, в основу которых была положена структурная дискретизация карты, полученной методом микроскопии.

Для этого на карту распределения слоев графена накладывалась регулярная сетка с квадратными ячейками, позволявшая определить параметры каждой ячейки по отдельности. При этом были установлены три степени порядка однородности ячейки – высокая, когда четко различаются параллельно расположенные отдельные слои графена, средняя, когда слои разорваны и ориентированы хаотически и низкая, когда четкие слои графена не наблюдаются. После определения степени порядка по всем ячейкам по отдельности, проводилась статистическая обработка структуры карты в целом.

Во всех упомянутых работах определение структуры каждой отдельной ячейки определялась визуальным образом, что, учитывая субъективный фактор, создавало некоторую неопределенность получаемых результатов.

В работе [42, 43] предложено определение параметров ячейки путем машинной обработки изображения с вычислением энтропии изображения по Шеннону [44, стр.264]. Проведено сравнение результатов ручной и машинной обработки карты и выявлены заметные преимущества машинной обработки.

В то же время, статистическая обработка карты, полученной тем или иным способом, продолжала требовать значительных усилий, поэтому для их минимизации был предложен метод обработки карт путем построения резистивной сетки. В работах [45, 46] такой метод был применен для анализа карты, снятой методом электросилового микроскопии [6, 33-35] и дискретизированной по двум уровням. Ввиду недостаточного

пространственного разрешения метода электросиловой микроскопии, наблюдение отдельных слоев графена не представлялось возможным.

Тем не менее, несмотря на недостаточное разрешение и ограничение всего двумя уровнями дискретизации, метод резистивной сетки показал весьма высокую эффективность.

В то же время, возможность применения резистивной сетки для карт, получаемых методом растровой электронной микроскопии, которые позволили бы наблюдать отдельные слои графена, выяснена не была.

Настоящая работа посвящена применению метода трехступенчатой резистивной сетки к картам, полученным с помощью высокоразрешающей растровой электронной микроскопии, дискретизированным по трем уровням порядка, что позволило уверенно наблюдать отдельные слои графена, причем проведено сравнение карт, дискретизация которых выполнена ручным и машинным методами.

1. Общая структура распределения углерода в шунгите

Экспериментальное исследование структуры высокоуглеродистого шунгита, проводимое методом высокоразрешающей растровой электронной микроскопии, показывает, что в общем случае эта структура образована слоями графена, как хаотично расположенными, так и частично упакованными в пачки, некоторые из которых образуют протяженные ленты.

Каждая отдельная пачка представляет собой довольно правильную стопку из 5-7 слоев графена, имеющих толщину порядка 0,3-0,5 нм, разделенных такими же или несколько меньшими промежутками. Типичный размер пачек составляет 2-5 нм. Несколько пачек, следующих друг за другом и сохраняющих достаточно правильную структуру, образуют ленты протяженностью до 20-30 нм.

Электрическое сопротивление пачек вдоль слоев графена довольно мало, тогда как сопротивление той же пачки поперек слоев превышает сопротивление вдоль слоев на два-три порядка и более. Типичная величина удельного

сопротивления вдоль одного слоя графена составляет 10^{-7} Ом м, а поперек того же слоя – около 10^{-3} Ом м. При хаотическом расположении слоев локальное сопротивление на длине, сопоставимой с размером одной пачки, может меняться в тех же пределах. При этом полное сопротивление структуры в целом будет состоять из сопротивлений таких локальных участков, соединенных в случайной последовательности, так что электрический ток может проходить по весьма извилистым траекториям.

2. Методы исследования локального распределения углерода

В то же время, поскольку значительную часть структуры составляют более или менее упорядоченные графеновые пачки, можно полагать, что на размерах того же порядка, что и пачка, сопротивление меняется достаточно мало, то есть вся структура состоит из локализованных довольно однородных участков, размеры которых близки к размерам типичной графеновой пачки.

Для анализа такой структуры в работах [33-35] был предложен метод ячеистой дискретизации, позволивший определить электрические параметры шунгита, состоящего из хаотически распределенных слоев углерода, разделенных прослойками кварца.

В этой работе для снятия карт содержания углерода использовался метод электросиловой микроскопии. Размер исходной карты составлял 20 на 20 мкм. На эту карту накладывалась сетка из квадратных ячеек размером 1 на 1 мкм, после чего в каждой ячейке анализировалась степень ее почернения. Если черный цвет занимал более половины площади ячейки, то такая ячейка вся целиком окрашивалась в черный цвет. Если черный цвет занимал менее половины площади ячейки, то такая ячейка окрашивалась в белый цвет. Таким образом, дискретизация проводилась по двум уровням – углерода и кварца, белого и черного, так что именовалась «бинарной».

Метод электросиловой микроскопии позволил различить области углерода достаточно большой величины – более 1 мкм, которые содержали огромное количество слоев графена, перепутанных недоступным измерению образом.

Для более подробного исследования углеродных формирований шунгита в работах [47-49] был использован метод высокоразрешающей растровой электронной микроскопии. Результатом работы метода являлись карты распределения углерода с разрешением порядка 1 нм, так что вполне отчетливо просматривались наблюдаемые «в торец» слои графена и промежутки между ними. В черно-белом изображении слои графена выглядели черными полосами, а разделяющие их промежутки оставались белыми. Настоящая работа посвящена исследованию именно таких карт.

3. Структурная дискретизация исходной карты

Для исследования карт, полученных методом высокоразрешающей растровой микроскопии, использовалась их дискретизация по трем уровням.

Такая дискретизация осуществлялась наложением на карту сетки с квадратными ячейками размером 2-3 нм, что соответствовало величине типичной пачки.

На рис. 1 показана общая схема первичной дискретизации карты, используемой в настоящей работе. На рисунке слева (а) приведена исходная карта, полученная методом растровой микроскопии, посередине (б) – накладываемая на карту сетка и справа (в) – карта с наложенной сеткой. Каждая горизонтальная строка и каждый вертикальный столбец сетки содержит по 20 ячеек. Размер каждой ячейки выбран равным 2x2 нм, что как раз близко к типичному размеру графеновой пачки. Размер полной сетки составляет 40x40 нм, так что сетка в целом содержит 400 ячеек. Для лучшего рассмотрения структуры рис. 1а и рис. 1в авторы рекомендуют читателю увеличить масштаб этих рисунков в 2-3 раза.

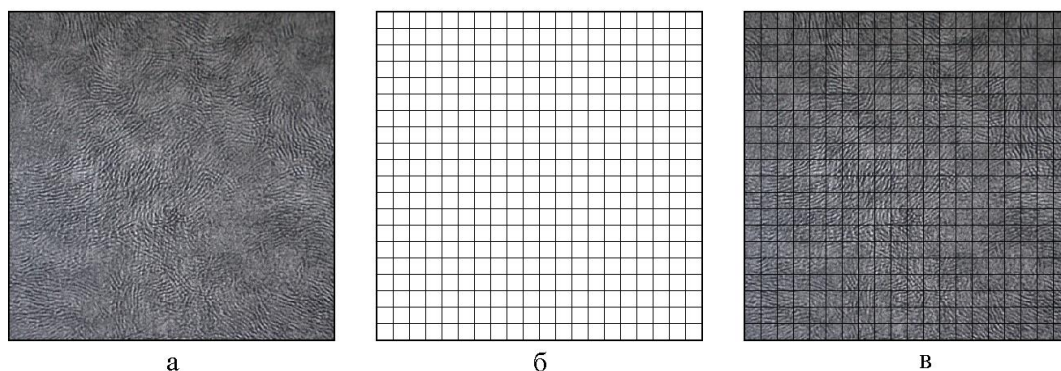


Рис. 1. Схема дискретизации карты: а – исходная карта, полученная методом растровой электронной микроскопии; б – сетка, накладываемая на карту; в – та же карта с наложенной сеткой.

Из рисунка видно, что исходная карта представляет собой довольно сложное переплетение черных и белых полос и ограниченных пятен примерно одинаковой ширины (около 0.5 нм), причем имеются области как с регулярным расположением полос, то есть «пачки», так и с беспорядочным, почти хаотическим распределением черных и белых пятен, представляющих собой случайным образом разорванные куски слоев графена. Значительные области карты имеют почти однотонный серый цвет, образованный случайной ориентацией слоев графена, так что слои наблюдаются не «в торец», а под некоторым углом к плоскости образца.

Дальнейший анализ дискретизированной карты проводился в каждой ячейке по отдельности. Подобно [47], для характеристики структуры ячейки был введен параметр «степени однородности» или «степени порядка», для которого различались три градации.

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.

4. Определение степени порядка ячеек дискретизированной карты

Определение степени порядка проводилось двумя методами: ручным и машинным. При том и другом методе каждой степени порядка данной ячейки присваивался определенный цвет в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2.

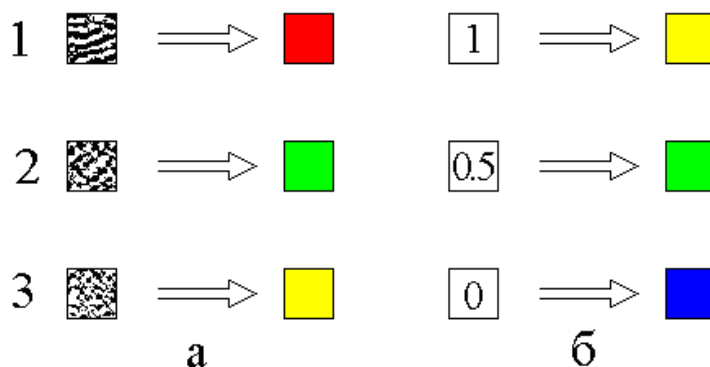


Рис. 2. Схема расцветки ячеек карты при ручной (а) и машинной (б) обработке. Горизонтальные ряды, обозначенные цифрами 1, 2, 3, соответствуют степеням порядка ячейки: 1 – степень порядка высокая; 2 – степень порядка средняя; 3 – степень порядка низкая.

Приведем краткую схему той и другой обработки, следуя [47-49] и [42, 43].

4.1. Ручная обработка

При ручной обработке [47-49] степень порядка ячейки определялась путем визуального анализа. Для этого на карту накладывалась непрозрачная подвижная маска с окном, соответствующим размеру одной ячейки. В процессе обработки маска перемещалась по строкам карты слева направо и сверху вниз, осуществляя развертку по всей карте. При этом окно маски последовательными шагами совмещалось с контуром той или иной ячейки, где визуально определялась степень ее порядка по трем уровням, как это показано в левом столбце на рис. 2а. Для записи результатов использовалась дополнительная сетка, ячейки которой по мере определения степени их порядка окрашивались тем или иным цветом в соответствии с рис. 2а.

4.2. Машинная обработка

При машинной обработке [42, 43] степень порядка определялась путем машинного анализа изображения каждой ячейки в отдельности, следуя алгоритму вычисления по отдельным пикселям энтропии по Шеннону. Для этого сначала с использованием свободного программного обеспечения Gwyddion изображение первичной карты рис. 1а переводилось в формат оттенков серого, значения которого в каждом пикселе менялись от 0 до 255. Далее, с использованием языка Python карта разбивалась на ячейки подобно рис. 1в, после чего с помощью функции `skimage` каждая ячейка представлялась в виде 60x60 пикселей, на основании которых вычислялось значение структурной энтропии по формуле Шеннона:

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

где P_i – относительное количество пикселей для всех имеющихся значений яркости. Получаемые значения энтропии были нормированы на 100 % по трем уровням: первый от 0 % до 30 %, второй – от 30 % до 60 %, третий – от 60 % до 100 %. Эти значения нормировались далее на интервал от нуля до единицы, так что максимальному значению энтропии, то есть высшей упорядоченности изображения (от 60 % до 100 %) соответствовало число 1, а минимальному значению энтропии, то есть низшему порядку изображения (от 0 % до 30 %) соответствовало число 0. На середине этого интервала, то есть при средней степени порядка (от 30 % до 60 %) энтропия составляла 0,5 нормированных единиц.

Подобно ручной обработке вычисление энтропии ячеек проводилось последовательно по строкам карты слева направо и сверху вниз, осуществляя развертку по всей карте. В соответствии с полученным числовым значением энтропии каждой ячейке карты присваивался определенный цвет, как показано на рис. 2б.

Замечание. Использованный здесь термин «энтропия» соответствует принятому в теории информации определению по Шеннону [50, стр.471,

форм.(18.2.2)], [44, стр.264], отличному от определения энтропии по Больцману-Гиббсу, принятому в статистической термодинамике [51, стр.429, форм.(25,4)]. Так, по Больцману-Гиббсу максимальная энтропия соответствует хаотическому беспорядку, а минимальная – высокому упорядочению. По Шеннону соотношение обратное: высокая энтропия соответствует максимальному упорядочению, низкая – отсутствию порядка. В настоящей работе авторы не сочли уместным дискутировать по поводу целесообразности того или иного определения, так что воспользовались терминологией, принятой в теории информации, используемой при машинной обработке изображений (в том числе, в библиотеке `skimage` в языке Python).

5. Сравнение ручной и машинной обработки дискретизированной карты

На первом этапе настоящей работы было проведено сравнение результатов ручной и машинной обработки первичной дискретизированной карты (рис. 1в), которое иллюстрируется рис. 3.

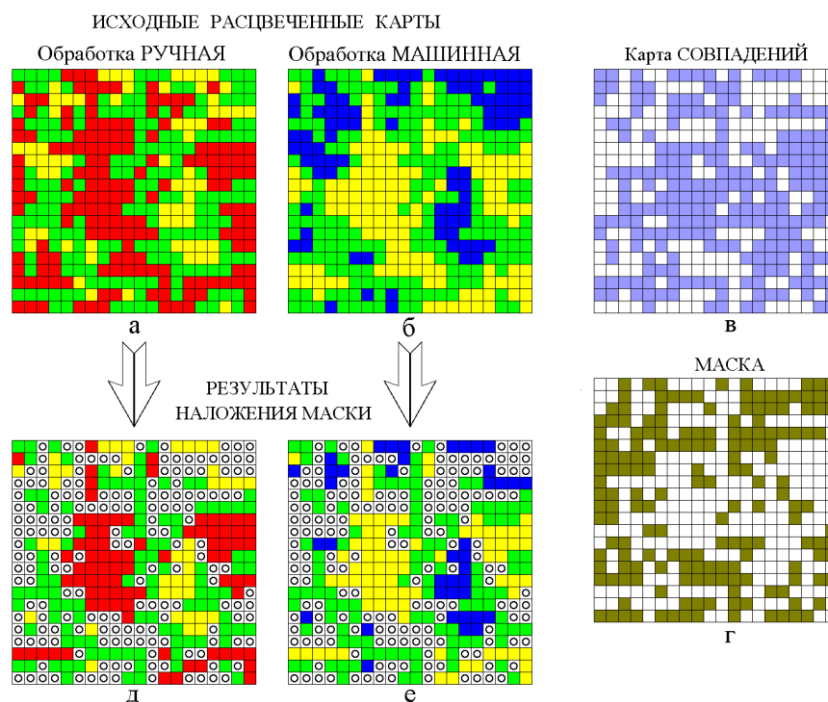


Рис. 3. Сравнение ручной и машинной обработки дискретизированной карты: а – карта, расцвеченная при ручной обработке; б – карта, расцвеченная при машинной обработке; в – карта ячеек, совпадающих по обеим обработкам; г – маска (обратная карте совпадений); д – результат наложения маски на ручную обработку; е – результат наложения маски на машинную обработку. Цвета ячеек соответствуют схемам, приведенным на рис. 2.

Здесь на рис. 3а и рис. 3б – карты при ручной и машинной обработке, расцветенные по степени порядка в соответствии с рис. 2.

Дальнейшим шагом явилась проверка степени порядка между тем и другим способами обработки путем сопоставления соответствующих цветов, результаты которого заносились на сетку, представленную на рис. 3в. Так, если ячейка при ручной обработке имела красный цвет и такая же ячейка при машинной обработке имела желтый цвет, то степень порядка таких ячеек считалась одинаковой и клетка на сетке рис. 3в окрашивалась в фиолетовый цвет. Однако, если красный цвет ячейки при ручной обработке соответствовал синему или зеленому цвету той же ячейки при машинной обработке, то степень порядка таких ячеек считалась различной и соответствующая ячейка на рис. 3в оставалась белой. Такое же сравнение проводилось при средней и низкой степеням порядка. Аналогичное сравнение проводилось далее для всех попарно соответствующих ячеек обеих карт, в результате чего получалась сетка из фиолетовых и белых ячеек, первые из которых соответствовали одинаковой степени порядка, а вторые – различной. Полученная карта совпадений представлена на рис. 3в.

Далее в этой карте производилась обращение цветов, так что фиолетовый цвет заменялся на белый, а белый – на серо-зеленый соответственно. Получалась карта, называемая далее маской, в которой белые ячейки соответствовали совпадению степеней порядка, а серо-зеленые их различию. Полученная маска показана на рис. 3г.

Последним шагом явилось наложение маски на исходные карты ручной и машинной обработки, представленные на рис. 3а и рис. 3б. При этом белые ячейки маски не меняли цвета ячеек исходных карт, а серо-зеленые заменялись на белую ячейку с нулем посередине. Карты, полученные в результате такого наложения маски, показаны на рис. 3д (ручная обработка) и рис. 3е (машинная обработка).

Из рис. 3 в целом можно видеть, что замена цветов на картах рис. 3д и рис. 3е в соответствии с рис. 2 приводит к одинаковым результатам, чего и

следовало ожидать, так как обе эти карты получены путем исключения ячеек, степени порядка которых не совпадают.

Прямой подсчет числа совпадений и несовпадений, который удобно провести по карте рис. 3в, показывает, что число совпадений при ручной и машинной обработке равно 228 ед., а число несовпадений – 172 ед. Таким образом, учитывая, что полное число ячеек по всей карте равно 400 ед., то совпадения составляют 57 % ячеек от полного их числа. Соответственно несовпадения составляют 43 % от того же числа. То есть соответствие между ручной и машинной обработкой составляет 57 %.

6. Замечание о степени соответствия ручной и машинной обработок

В разделе 5 показано, что степень совпадения результатов ручной и машинной обработки составляет около 57 %. В работе [47] для такой же характеристики установлено значение 66 %. Несколько округляя, можно считать степень совпадения равной 60 %. Таким образом, совпадение далеко не достигает 100 %.

Однако такое различие нельзя относить только за счет неточности ручной обработки, обусловленной субъективным фактором. Так, в работе [47] степень точности ручной обработки как таковой с учетом субъективного фактора установлена на уровне 69 %, то есть ошибка ручной обработки может составлять около 30 %.

Для простоты положим теперь, что на 100 случаев машинной обработки приходится совпадающих только 60 случаев ручной. Из этих 60 случаев 30 % равны 18 случаям, так что с учетом ошибки на ручную обработку будет приходиться от 42 до 78 случаев. Таким образом видно, что на 100 случаев машинной обработки в самом лучшем варианте может приходиться только 78 случаев ручной, так что соответствие опять не достигает 100 %, ограничиваясь где-то на уровне около 89 %.

Можно полагать, что столь высокая степень различия обусловлена тем обстоятельством, что в обоих случаях измеряются несколько отличающиеся

величины. Так, ручная обработка учитывает упорядоченность структуры на уровне цельных графеновых слоев, тогда как машинная – на уровне энтропии распределения 60x60 пикселей в пределах ячейки.

В такой ситуации авторы настоящей работы считают целесообразным рассмотреть оба вида обработки с последующим сравнением получаемых результатов, что и будет сделано далее.

7. Соотношение степеней порядка при ручной и машинной обработках

Для более подробного рассмотрения соответствия степеней порядка при ручной и машинной обработке обратимся к таблице №1.

Таблица №1. Соответствие степеней порядка при ручной и машинной обработках.

| Единицы измерения | Степени порядка | | | Сумма |
|-----------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| | Высокая | Средняя | Низкая | |
| Абсолютные | 81 | 107 | 40 | 228 |
| Процентные | 35,5 % | 47,0 % | 17,5 % | 100 % |
| Данные из работы [47] | | | | |
| Нормированные | 0.353 ± 0.052 | 0.472 ± 0.042 | 0.174 ± 0.048 | 0,9990 ± 0.047 |
| Процентные | 35,4 % | 47,3 % | 17,3 % | 100 % |

Здесь в первой строке приведены количества ячеек с совпадающими степенями порядка при обеих обработках, полученные из карты совпадений на рис. 3в. В последнем столбце этой строки – полная сумма совпадающих ячеек. Во второй строке приведены те же количества совпадений, выраженные в процентах. Видно, что наибольшее число совпадений (47,0 %) приходится на среднюю степень порядка.

Ниже для сравнения приведены данные из работы [47, табл.№7], характеризующие точность ручной обработки. Эти данные получены путем усреднения значений по 25 картам из четырех образцов. Можно видеть, что

полученные здесь степени порядка, выраженные в процентах, совпадают с усредненными данными с весьма высокой точностью (около 0,3 %).

Заметим, однако, что такое совпадение всеобщим не является. Так, в той же работе показано, что на лучшем образце №2 отклонение от средних значений, по высокой степени порядка составляет около 6,5 % вверх, по средней степени – 0,6 % вверх, по низкой – 14,3 % вниз. Более того, в настоящей работе рассматривается соотношение между степенями порядка в рамках заданного полного числа совпадений (228 ед. по двум картам), тогда как в работе [47] рассматривается соотношение между степенями порядка в рамках каждой полной карты (256 ед. по каждой карте), усредненное по нескольким образцам, то есть сравниваются несколько отличающиеся величины. Тем не менее, в плане выполняемого здесь сравнения ручной обработки с машинной, совпадение распределения порядка по степеням с подобным распределением при ручной обработке можно признать довольно высоким.

8. Общая схема метода резистивной сетки

В рамках настоящей работы для определения электрических параметров шунгита будем использовать метод резистивной сетки, подобный предложенному в работах [45, 46].

Метод резистивной сетки состоит в том, что каждой ячейке дискретизированной карты присваивается определенная величина удельного сопротивления, исходящая из наблюдаемой структуры распределения слоев графена в этой ячейке. Электрические параметры каждой ячейки сетки формируются в виде комбинации из четырех резисторов карты, образующих данную ячейку сетки. Из таких комбинаций составляется общая электрическая схема, учитывающая связи между ячейками. Эта схема сначала максимально упрощается с учетом параллельных и последовательных соединений между резисторами, после чего приводится к виду, представляющему собой квадратичную структуру, состоящую из квадратных ячеек, образующих горизонтальные строки, с перпендикулярными им вертикальными столбцами.

Такая сетка из резисторов далее «сворачивается» в единый резистор с использованием электрических соединений по схеме «звезды» и «треугольника», объединенных в два «пропагатора» в соответствии с алгоритмом Франка-Лобба [52], детальная описание которого приведено в превосходном учебном пособии [53, стр.288-305].

Первая попытка применения метода резистивной сетки к шунгиту была сделана в работе [54]. Предложенная там структура отдельной ячейки содержала диагональные элементы, для раскрытия которых использовались законы Кирхгофа. Значительная громоздкость получаемых выражений не позволила рассмотреть сетку с размерами более 2x2 ячеек, что значительно ограничило применимость предложенного метода.

В работах [45, 46] использована ячейка с крестообразным соединением резисторов, допускающая удобное «сворачивание» по алгоритму Франка-Лобба [52, 53], что позволило рассмотреть сетку с размерами 10x10 ячеек, чем значительно повысило возможности метода. В настоящей работе будет использована именно такая ячейка с такой сеткой.

9. Построение резистивной сетки

Метод резистивной сетки в своей основе предполагает присвоение каждой ячейке дискретизированной карты определенного электрического сопротивления с последующим объединением таких сопротивлений в единую сеть из резисторов, которая далее сворачивается в единый резистор, представляющий собой сопротивление карты в целом.

В работах [45, 46] приведена схема построения резистивной сетки в случае, когда ячейки карты имеют только два определенных значения сопротивлений. В настоящей работе рассматривается сетка с тремя уровнями сопротивлений. Рассмотрим этапы формирования такой сетки последовательно

Для удобства рассмотрения, подобно [45], ограничимся небольшой картой размером 4x3 ячейки, то есть содержащей три горизонтальных строка из четырех

ячеек и четыре вертикальных столбца по три ячейки. Будем следить параллельно за ручной и машинной обработкой, для чего обратимся далее к рис. 4.

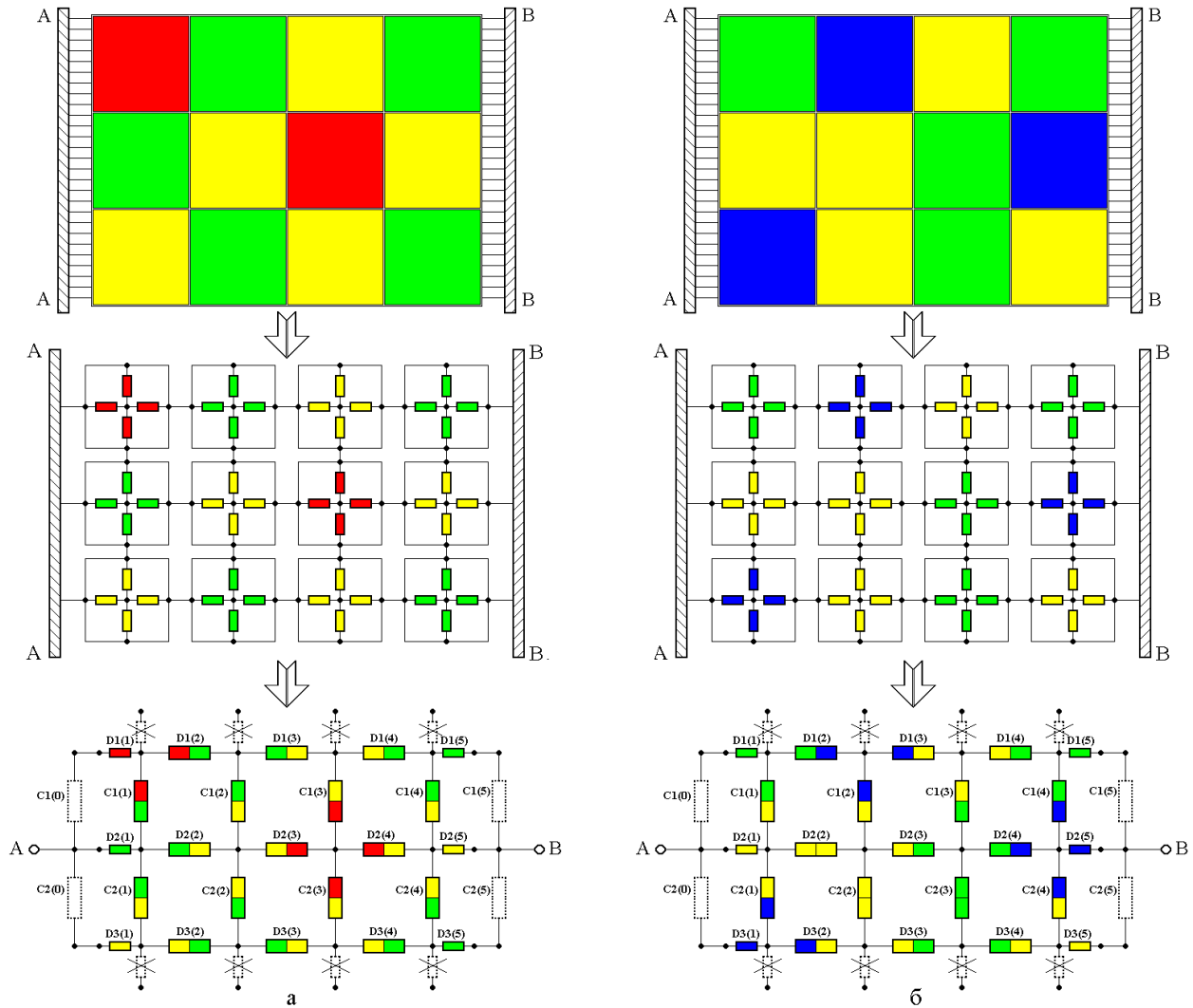


Рис. 4. Представление дискретизированной карты в виде сетки из резисторов: а – ручная обработка; б – машинная обработка. Верхний ряд – исходные расцветоченные карты; средний ряд – представление исходных ячеек обеих карт в виде крестообразного соединения резисторов; нижний ряд – преобразование крестообразной сетки в квадратную. AA и BB – контактные шины, A и B – эквивалентные им контакты. Стрелками показана последовательность преобразований.

На этом рисунке показана схема формирования первичной сетки из резисторов. В верхнем ряду представлены фрагменты карты, дискретизированной и расцветоченной путем ручной (слева) и машинной (справа) обработки. По обеим сторонам каждой карты находятся проводящие шины AA и BB, между которым и измеряется подлежащее дальнейшему определению сопротивление карты в целом.

На этом этапе предполагается, что каждая ячейка имеет то или иное сопротивление, соответствующее цвету данной ячейки. Таким образом, для карты как при ручной, так и при машинной обработке имеются три номинала сопротивлений, соответствующих трем цветам в том и другом случае. Задание конкретных номиналов сопротивлений будет рассмотрено далее.

В среднем ряду каждая ячейка исходной карты заменена четырьмя резисторами, соединенными крестообразным образом. Заметим, что при такой замене номинал каждого сопротивления крестообразной ячейки должен быть в два раза меньше номинала сопротивления исходной ячейки. При этом полное сопротивление ячейки в целом не меняется, так как противоположно расположенные сопротивления крестообразной ячейки соединены между собой последовательно. Цвета резисторов крестообразных ячеек соответствуют цветам карт верхнего ряда. В этом случае ячейки соединены между собой через резисторы, примыкающие к тем или иным граням ячейки, как это соответствует геометрии исходной карты. Получаемая сетка из резисторов называется далее «крестообразной»

Следующим шагом является упрощение крестообразной сетки с использованием правил последовательного соединения резисторов. Места таких последовательных соединения находятся на каждой грани соприкосновения соседствующих ячеек. Получаемые при этом сетки для ручной и машинной обработки представлены в нижнем ряду на рис. 4. Здесь резисторы, получаемые в результате последовательных соединений, отмечены двумя цветами, соответствующими расцветке исходных карт. Резисторы на верхней и нижней границах сетки не контактируют с резисторами других ячеек, поэтому из рассмотрения исключены (на рисунке перечеркнуты). Резисторы на правом и левом краях сетки также не контактируют с другими ячейками, однако в формировании общей проводимости участвуют, так как присоединены к общим контактным шинам AA и BB, поэтому отмечены единым цветом, соответствующим цвету исходной ячейки. Получаемая при этом сетка из резисторов называется далее «квадратной»

При машинном программировании для идентификации резисторов квадратной сетки были введены обозначения $DI(J)$ и $CK(L)$. Здесь ряды горизонтально ориентированных резисторов обозначены буквой D с номером ряда, считаемым сверху, то есть первый сверху ряд – $D1$, второй – $D2$, третий – $D3$. Цифры в скобках – номера элементов ряда слева направо от 1 до 5. Ряды вертикально ориентированных резисторов обозначены буквой C с номером ряда, то есть первый сверху ряд – $C1$, второй – $C2$. Цифры в скобках – номера элементов ряда слева направо от 0 до 5. Как сказано выше, номиналы резисторов $C1(0)$, $C1(5)$, $C2(0)$, $C2(5)$ равны нулю. На рис. 4 эти обозначения приведены при каждом из резисторов соответствующих квадратных сеток.

Дальнейшее построение резистивной сетки для случаев ручной и машинной обработки принципиальных различий не имеет, поэтому ограничимся представлением дальнейших рисунков в черно-белом виде.

На рис. 5 представлена схема электрических соединений квадратной сетки, приведенной в нижнем ряду на рис. 4. Для простоты рисунка схемные условные знаки резисторов (прямоугольники) опущены.

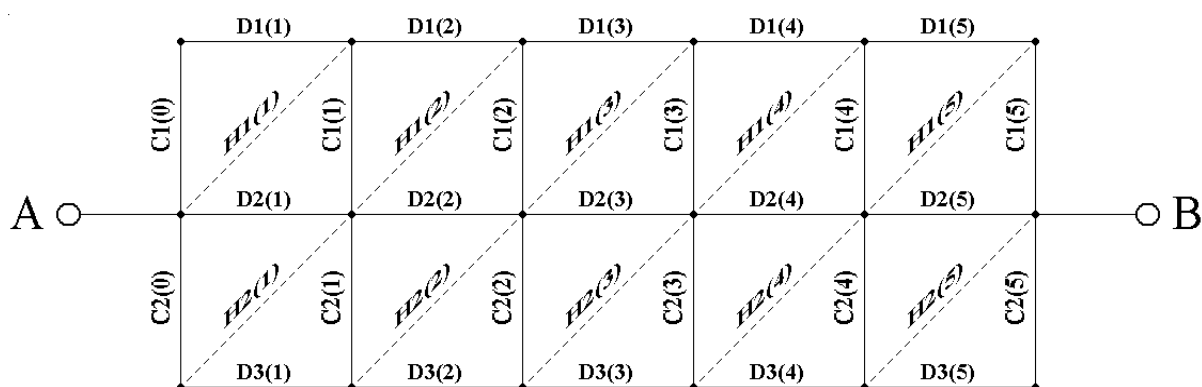


Рис. 5. Схема электрических соединений квадратной сетки, приведенной в нижнем ряду на рис. 4.

В рамках настоящей работы, подобно [45, 46], использовался машинный язык Фортран с размещением данных в одномерных массивах. Так, верхний ряд горизонтально ориентированных резисторов составлял массив $D1(J)$, где J – номер элемента массива. Соответственно следующий ряд резисторов составлял массив $D2(J)$ и так далее. Верхний ряд вертикально ориентированных

резисторов составлял массив $C1(K)$, следующий – массив $C2(K)$ и так далее. Кроме того, при сворачивании сетки возникали диагонально ориентированные резисторы, для которых использовались массивы $H1(M)$, $H2(M)$ и так далее. На рис. 5 такие резисторы показаны пунктиром.

Полное количество массивов определялось числом ячеек исходной карты. Так, для карты, имеющей N строк и столько же N столбцов, число массивов D равнялось N , а число массивов C и H равнялось $N - 1$. Массивы D и H имели $N + 1$ элементов, а массивы C имели $N + 2$ элементов.

10. Сворачивание резистивной сетки

После построения резистивной сетки следующим шагом является ее «сворачивание», результатом которого будет приведение сетки к единому резистору, сопротивление которого равно сопротивлению исходной сетки в целом.

Для сворачивания сетки, соответствующей карте шунгита, в работе [45] предложено использование алгоритма Франка-Лобба [52,53]. Следуя [45], приведем краткую схему сворачивания, пригодную для рассмотрения карт, исследуемых в настоящей работе.

В общем случае для сворачивания сетки можно использовать правила последовательного и параллельного соединений резисторов, причем особенно важным является применение преобразований комбинаций из трех резисторов, соединенных по схеме треугольника и звезды. Для сеток с числом резисторов более десятка такое преобразование является весьма трудоемким, поэтому с целью сокращения числа требуемых операций в работе [52] было предложено использование более сложных комбинаций из резисторов, называемых «пропагаторами».

Основное значение для настоящего рассмотрения имеют два пропагатора №1 и №2. Рассмотрим их работу последовательно.

На рис. 6 приведена схема последовательных шагов при использовании пропагатора №1.

Пропагатор №1

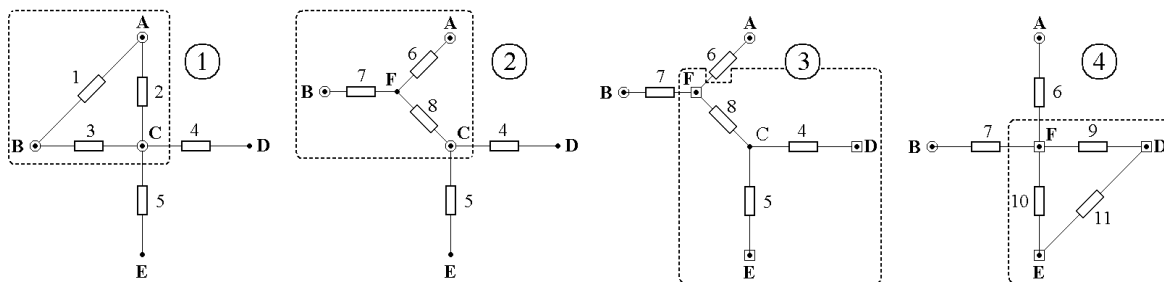


Рис. 6. Схема работы пропагатора №1. Цифры в кругах – номера шагов пропагатора. Цифры при резисторах – номера соответствующих резисторов. Буквы А, В, С, D, E, F – узловые точки соединений резисторов.

Здесь на шаге 1 приведена схема исходного соединения резисторов, затрагиваемых пропагатором. При этом А, В, D, E – точки соединения с соседствующими резисторами квадратной сетки, имеющей схему, подобную приведенной на рис. 5. На шаге 2 к резисторам 1, 2, 3 применяется схема преобразования треугольника ABC в звезду с теми же узловыми точками А, В, С. На шаге 3 к звезде FDE, образованную резисторами 8, 4, 5, применяется преобразование в треугольник FDE, получающийся на шаге 4. При этом центральная точка С на шаге 1 заменяется на центральную точку F на шаге 4.

В результате работы пропагатора в целом парные сопротивления между точками А-В, А-D, D-E, E-В на шаге 1 и теми же точками на шаге 4 сохраняются неизменными, так что замена схемы, приведенной на шаге 1 схемой, приведенной на шаге 4, общего сопротивления сетки в целом не меняет.

Главным результатом работы пропагатора является исключение из рассмотрения резистора 1 на шаге 1, что позволяет «вырезать» из полной сетки одну из диагоналей соответствующей ячейки. При этом, однако, возникает новый резистор 11 между точками D и E на шаге 4, которого между теми же точками на шаге 1 не было. То есть появляется новый диагональный резистор, для которого при программировании используется массив типа $HP(Q)$, представленный на рис. 5 элементами $H1(M)$, $H2(M)$ и так далее.

Сворачивание полной сетки, подобной представленной на рис. 5, начинается с левого верхнего ее угла. Здесь резисторы $D1(1)$ и $C1(0)$ сначала

суммируются по схеме последовательного соединения с учетом того, что сопротивление резистора $C1(0)$ равно нулю, в результате чего получается диагональный резистор $H1(1)$. Далее, к этому углу применяется пропегатор №1, в результате чего резистор $H1(1)$ удаляется и появляется новый диагональный резистор $H2(2)$. Далее, освободившийся в левом верхнем узле резистор $D2(1)$ складывается с равным нулю резистором $C2(0)$, так что появляется диагональный резистор $H2(1)$. Теперь к образовавшемуся новому углу сетки снова применяется пропегатор №1, уничтожающий резистор $H2(1)$ и создающий резистор $H3(1)$ (на рис. 5 не показан, так как выходит за нижний край представленной на этом рисунке сетки).

Дальнейшее сворачивание состоит в том, что пропегатор №1 последовательно перемещается по первому вертикальному столбцу сетки до тех пор, пока он может создавать диагональные резисторы типа $H1(Q)$, то есть до нижнего края сетки, где места для образования нового резистора типа $H1(Q)$ не остается (подобно резистору $H3(1)$ для сетки на рис. 5, который вылезает за нижний ее край).

Здесь вступает в работу пропегатор №2, схема работы которого представлена на рис. 7.

Пропегатор №2

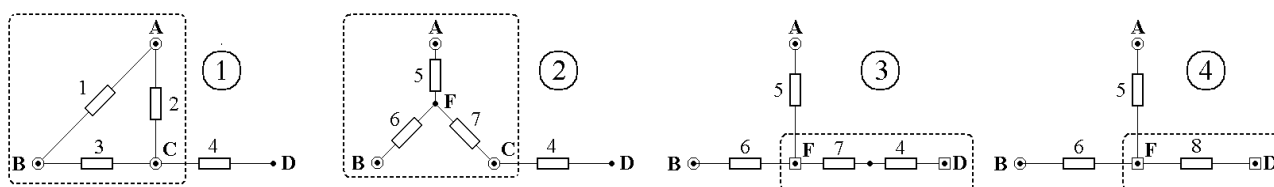


Рис. 7. Схема работы пропегатора №2. Цифры в кругах – номера шагов пропегатора. Цифры при резисторах – номера соответствующих резисторов. Буквы А, В, С, D, Е, F – узловые точки соединений резисторов.

Можно видеть, что здесь резисторы, отходящие вниз от основной горизонтали между точками В и D, отсутствуют, поэтому этот пропегатор удобно применять на нижнем крае сетки, ниже которого резисторов уже нет.

Работа пропагатора №2 подобна работе пропагатора №1. Здесь из треугольника ВАС на шаге 1 формируется звезда с теми же узловыми точками на шаге 2, при которой образуется центральная точка F. Далее, на шаге 3 эта точка опускается вниз на линию В-D, где последовательно соединенные резисторы 7 и 4 на шаге 4 образуют новый резистор 8. Таким образом, все резисторы первого столбца исходной сетки уничтожаются, а весь первый столбец заменяется единственным резистором 6, заключенным на шаге 4 между точками В и F.

На этом работа пропагатора №2 заканчивается, а пропагатор №1 снова начинает работу с верхней ячейки второго столбца, левая сторона которого в результате удаления первого столбца теперь стала свободной.

Пропагатор №1 последовательно опускается вниз, обрабатывая второй столбец, на нижнем краю которого снова вступает в действие пропагатор №2, а пропагатор №1 переходит на третий столбец и так далее. При этом на месте уничтоженного второго столбца на нижнем краю сетки остается один резистор, подобный оставшемуся от первого столбца (как 6 на шаге 4 рис. 7).

Когда от всей стеки остается только один последний столбец, соответствующий крайнему правому краю сетки, пропагаторы дальше работать не могут, так как правее правого края сетки нет, но здесь вступают в действие правила параллельного и последовательного соединений, которые приводят этот последний столбец также к единственному резистору, расположенному на нижнем крае сетки.

Таким образом, в результате такого сворачивания от всей сетки остается цепь последовательно соединенных резисторов, каждый из которых соответствует нижнему краю соответствующего столбца. Схема такой цепи показана на рис. 8.

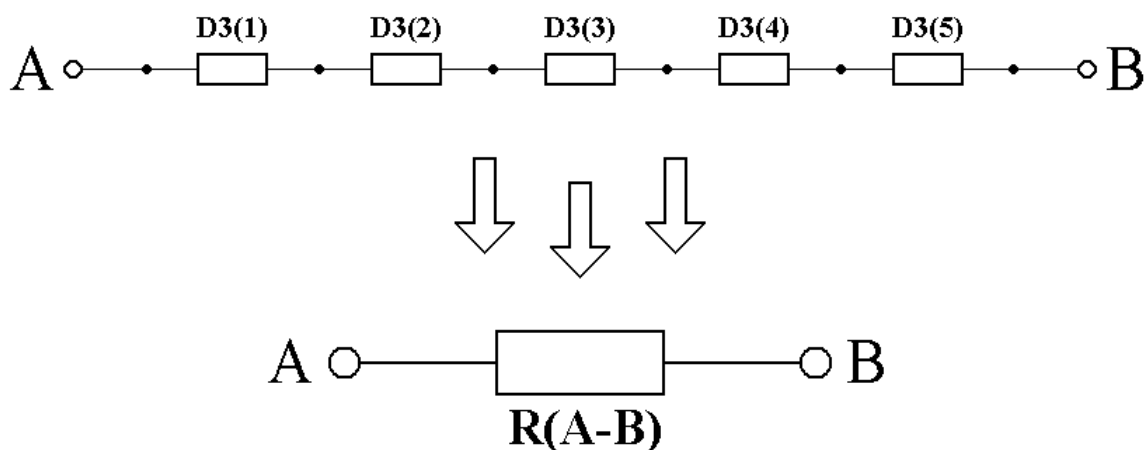


Рис. 8. Схема цепи, остающейся от сетки, подобной представленной на рис. 5.

В верхней части рисунка в качестве примера показана цепочка из последовательно соединенных резисторов, соответствующая сетке, представленной на рис. 5. Эта цепочка сворачивается по схеме последовательного соединения, в результате чего получается показанный в нижней части рисунка единственный резистор между контактными точками А и В, соответствующими контактными шинам АА и ВВ исходной сетки на рис. 4.

Этим шагом сворачивание резистивной сетки заканчивается и далее следует ее анализ на основе задаваемых значений сопротивлений ячеек исходных расцветочных карт.

Замечание. Следует заметить, что в настоящем разделе приведена лишь общая схема сворачивания резистивной сетки. При практическом выполнении такого сворачивания на каждом шаге того или иного преобразования должен осуществляться количественный расчет сопротивлений получающихся резисторов на основе значений сопротивлений исходных резисторов. Аналитические формулы, необходимые для такого расчета, в том числе для обоих пропагаторов, приведены в работе [45, форм.(10)-(19)], так что их повторение здесь авторы полагают излишним. При практическом программировании формулы для пропагаторов могут быть достаточно удобно выполнены в виде двух отдельных достаточно компактных подпрограмм, обращение к которым не усложняет текста основной программы.

11. Оцифровка расцветочной карты

Для применения метода резистивной сетки каждому цвету расцветочной карты должно быть приведено в соответствие определенное значение сопротивления. При этом расцветочные карты превращаются в карты, ячейки которых получают заполненными определенными числами, то есть происходит «оцифровка» расцветочных карт. Приведем краткую схему такой оцифровки.

Каждая исходная расцветочная карта содержит 20x20 ячеек. В то же время, используемая в настоящей работе резистивная сетка содержит 10x10 ячеек. Причина ограничения десятью ячейками вызвана сложностью программирования, возрастающей пропорционально квадрату числа ячеек в строке или столбце карты. Этот вопрос подробно рассмотрен в работе [45], поэтому здесь не обсуждается.

Для применения метода резистивной сетки каждая исходная расцветочная карта разделяется на четыре частичные карты, как показано на рис. 9.

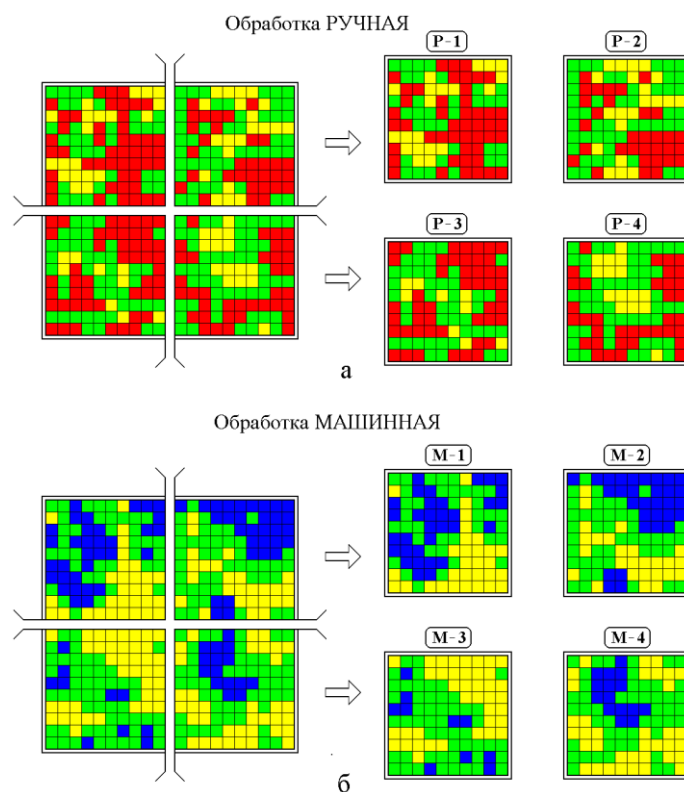


Рис. 9. Разделение полной расцветочной карты на частичные карты:
 а – ручная обработка, частичные карты P-1, P-2, P-3, P-4;
 б – машинная обработка, частичные карты M-1, M-2, M-3, M-4.

Линии разреза полной карты на частичные проводятся на серединах горизонтального и вертикального размеров исходной карты, как показано в левой части рисунка. В результате из каждой полной исходной карты размером 20x20 ячеек получаются четыре частичных карты размером 10x10 ячеек, показанные в правой части рисунка.

Как отмечено в разделе 4, расцветивание карты в соответствии со структурными характеристиками ячеек проводилось по трем цветам. Соответственно процедура оцифровки состояла в присвоении каждому цвету определенного числа, отражающего структуру окрашенной этим цветом ячейки.

В рамках настоящей работы предполагалось, что сопротивление ячейки обратно пропорционально степени порядка расположения слоев графена в этой ячейке. При этом, поскольку проводимость шунгита определяется содержанием углерода, то полагалось, что самым малым сопротивлением обладает ячейка с высокой степенью порядка, средним – со средней степенью порядка и самым большим – ячейка с низкой степенью порядка.

В качестве опорной точки была избрана проводимость углерода, обеспечивающая ячейке с высокой степенью порядка минимальное сопротивление. Такой опорной точке было присвоено значение, равное единице, так что значения всех остальных ячеек, имевших среднюю и низкую степени порядка, единицу превышали.

Таким образом, для случая ручной обработки красному цвету было присвоено число, равное единице, а зеленому и желтому цветам – числовые значения P и N , где $P > 1$ и $N > P$, которые дальше можно было варьировать.

Для случая машинной обработки желтому цвету было присвоено значение, равное единице, а зеленому и синему цветам значения Q и M соответственно, где $Q > 1$ и $M > Q$. Схема распределения цифровых значений при обоих видах обработки представлена на рис. 10.

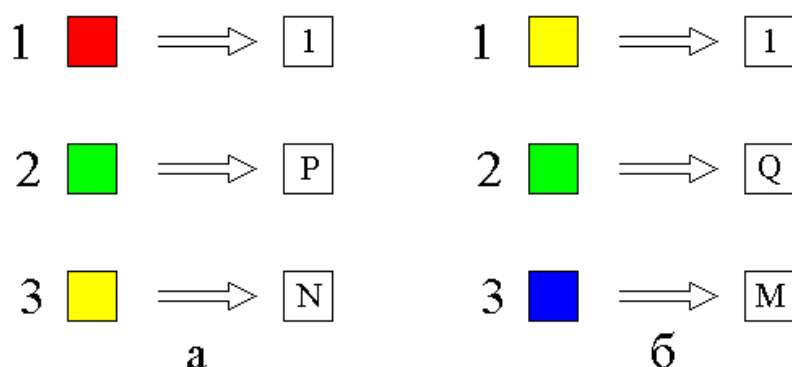


Рис. 10. Схема распределения числовых значений, соответствующих цветам расцветенных карт при ручной (а) и машинной (б) обработках.

Цифры в левых столбцах – степени порядка: 1 – высокая, 2 – средняя, 3 – низкая.

В результате такой оцифровки из расцветенной карты получалась оцифрованная карта такого же размера, ячейки которой были заполнены соответствующими числами. Для простоты терминологии далее оцифрованные карты будем называть «цифровыми» картами.

В качестве примера на рис. 11 приведены цифровые карты, полученные из частичных карт Р-1 (а) и М-1 (б), представленных на рис. 9.

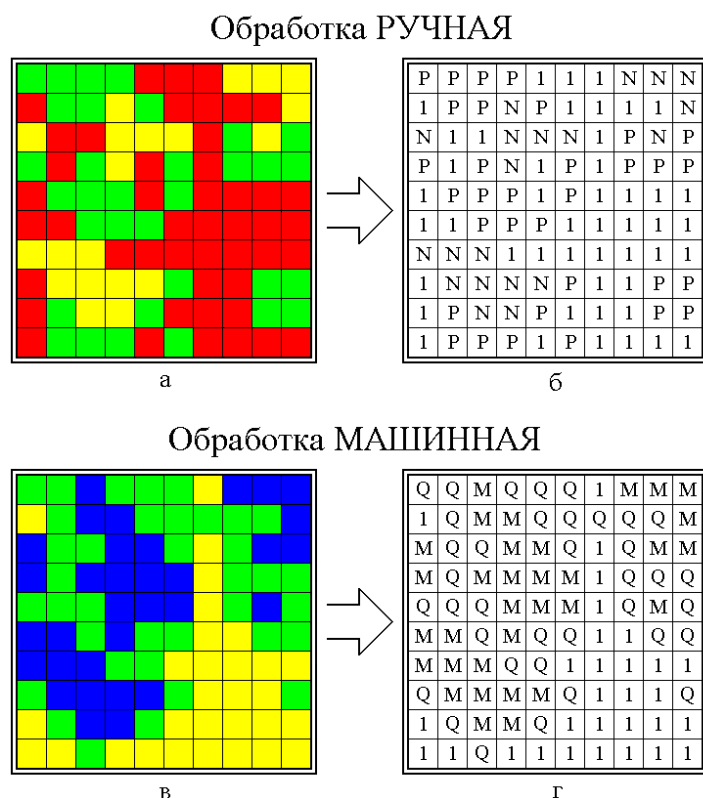


Рис. 11. Схема получения цифровых (оцифрованных) карт из частичных карт Р-1 (а – обработка ручная) и М-1 (б – обработка машинная), представленных на рис. 9.

Из рисунка видно, что теперь ячейки той и другой карт заполнены числами, что делает их пригодными для применения метода резистивной сетки.

Для удобства обращения с оцифрованными картами сохраним далее за ними те же обозначения P-1 – P-4 и M-1 – M-4, что были введены на рис. 9 для исходных частичных карт.

12. Применение метода резистивной сетки

Выполненная в разделе 11 оцифровка частичных карт позволяет непосредственно применить метод резистивной сетки. В работах [45, 46] этот метод был использован для карт шунгита, полученных методом электросиловой микроскопии, который позволяет определить локальную структуру материала только по двум уровням, соответствующим проводимости углерода и кварца по отдельности. В настоящей работе рассматриваются карты, полученные методом высокоразрешающей растровой электронной микроскопии, что позволяет выделить три уровня структуры расположения слоев графена на карте. Поэтому для применения метода резистивной сетки необходимо использовать три значения сопротивлений ячеек дискретизированной карты. Поскольку заранее эти сопротивления не известны, воспользуемся результатами работы [41].

В этой работе для анализа проводимости образцов был использован метод независимых каналов, состоящих из последовательно соединенных блоков, размеры которых были близки к размерам единичной графеновой пачки и на площади карты были представлены в виде ячеек размером 2x2 нм.

Было установлено, что главным фактором, определяющим проводимость шунгита при хаотическом распределении пачек, является сильная анизотропия проводимости вдоль и поперек единичного слоя графена, достигающая трех порядков.

Для сопротивлений блоков, исходя из экспериментально измеренных значений проводимости образцов в целом, были установлены три значения, соответствующие прохождению тока под углом к слоям графена от 0 до 90 градусов. Полученные значения сопротивлений приведены в таблице №2.

Таблица №2. Сопротивление блока при различных ориентациях слоев графена.

| Ориентация слоев графена (град.) | Сопротивление единичного блока (Ом) | Степень порядка (ед.) | Нормированные сопротивления ячеек (отн.ед.) |
|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|---|
| 0 | 12,5 | 1 | 1 |
| 45 | 2085,7 | 2 | 170 |
| 90 | 59473,0 | 3 | 5000 |

В этой таблице первые два столбца соответствуют столбцам таблицы №5 в работе [41]. Далее предполагается, что ориентации слоев графена соответствуют трем степеням порядка, рассмотренным в разделе 4. Эти степени порядка приведены в третьем столбце таблицы. В четвертом столбце приведены округленные, нормированные на минимальное сопротивление блока 12,5 Ом при нуле градусов, значения сопротивлений блока для двух других ориентаций (45 и 90 градусов). Таким образом, полагается, что эти сопротивления соответствуют степеням порядка, приведенным в третьем столбце таблицы. То есть для применения метода резистивной сетки имеются три значения сопротивлений, соответствующие трем степеням порядка, отмеченным на оцифрованных картах.

Замечание. Следует заметить, что используемое здесь предположение о соответствии сопротивлений при различных ориентациях слоев графена степеням порядка структуры ячеек дискретизированной карты, не является безупречным. В рамках настоящей работы такое предположение принято по причине отсутствия каких-либо более достоверных методов определения локального сопротивления ячеек.

В рамках настоящей работы в качестве начальной опорной точки используем сопротивления ячеек, приведенные в таблице №3.

Таблица №3. Нормированные сопротивления ячеек.

| Обозначения сопротивлений на картах | Сопротивления ячеек (отн.ед.) |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| Обработка РУЧНАЯ | |
| 1 | 1 |
| P | 170 |
| N | 5000 |
| Обработка МАШИННАЯ | |
| 1 | 1 |
| Q | 170 |
| M | 5000 |

В первом столбце таблицы приведены обозначения сопротивлений на частичных картах, оцифрованных в соответствии с рис. 11.

Во втором столбце таблицы приведены нормированные сопротивления ячеек, соответствующие четвертому столбцу таблицы №2.

Полученные в результате расчета по методу резистивной сетки значения сопротивлений частичных карт, приведенных на рис. 9, представлены в таблице №4.

Таблица №4. Сопротивления частичных карт при ручной и машинной обработке.

| Обработка РУЧНАЯ | | |
|---------------------------|------------------------------|---------------|
| Частичные Карты | Сопротивления частичных карт | Сетка 2x2 яч. |
| P-1 | 98,85 | 53,52 |
| P-2 | 177,91 | |
| P-3 | 57,21 | |
| P-4 | 12,18 | |
| Среднее | 86,59 ± 61,01 | |
| Обработка МАШИННАЯ | | |
| Частичные Карты | Сопротивления частичных карт | Сетка 2x2 яч. |
| M-1 | 147,46 | 74,11 |
| M-2 | 79,73 | |
| M-3 | 68,36 | |
| M-4 | 41,66 | |
| Среднее | 84,30 ± 38,99 | |

Здесь в первом столбце таблицы приведены номера карт, соответствующие рис. 9. Во втором столбце представлены сопротивления этих карт, полученные методом резистивной сетки для случаев ручной и машинной обработки. Внизу каждого раздела той и иной обработки приведены усредненные по четырем картам данного раздела значения сопротивлений. В последнем столбце приведены значения сопротивлений, полученные с помощью резистивной сетки размером 2×2 ячеек, для заполнения четырех ячеек которой использовались четыре значения сопротивлений, приведенные во втором столбце таблицы.

Из таблицы видно, что сопротивления частичных карт при обоих видах обработки отклоняются от среднего значения на довольно заметную величину. Так, отклонение при ручной обработке составляет около 70 %, а при машинной обработке хотя и на несколько меньшую величину, но все же составляет около 46 %.

В то же время, средние сопротивления по всем четырем частичным картам при той и другой обработке довольно близки: при ручной около 86,59 отн.ед. и при машинной – около 83,30 отн.ед., что дает среднюю величину $84.94 \pm 1,64$ отн.ед., так что отклонение составляет всего 1,93 %.

Замечание. Примененный при построении последнего столбца таблицы метод резистивной сетки размером 2×2 ячеек в рамках настоящей работы является дополнительным. При этом предполагается, что его использование допустимо, то есть каждая частичная карта ведет себя так, как будто она однородна и ее сопротивление изотропно. В то же время, нельзя забывать, что ячейки дискретизированной карты не вполне совпадают с ячейками сетки, а сдвинуты на половину ячейки, что получается при формировании квадратной сетки из крестообразной, как это видно из рис. 4. Более точному выяснению вопроса о применении сетки 2×2 авторы предполагают посвятить отдельную работу.

Сравним теперь сопротивления частичных карт, соответствующих одним и тем же участкам полной карты, то есть сравним сопротивления пар частичных карт Р-1 и М-1, Р-2 и М-2, Р-3 и М-3, Р-4 и М-4 соответственно, для чего обратимся к таблице №5.

Таблица №5. Сравнение сопротивления по парам карт обеих обработок.

| №№ карт (Р;М) | Обработка | | Среднее из обеих обработок | Отклон. от сред. (проц.%) | Среднее отклонение. (в проц.%) |
|---------------|-----------|--------|----------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| | РУЧН. | МАШ. | | | |
| 1 | 98,85 | 147,46 | 123,16±24,30 | 19,73 | 30,36±11,86 |
| 2 | 177,91 | 79,73 | 128,82±49,09 | 38,11 | |
| 3 | 57,21 | 68,36 | 62,78±5,57 | 8,87 | |
| 4 | 12,18 | 41,66 | 26,92±14,74 | 54,75 | |

Здесь в первом столбце приведены номера частичных карт по расположению в полной карте, во втором и третьем столбцах - соответствующие значения сопротивлений, совпадающие с такими же значениями в таблице №4, в четвертом столбце – среднее из обеих обработок, в пятом – отклонение от среднего по каждому номеру пары соответствующих карт, выраженное в процентах, и в шестом – среднее значение из всех отклонений, приведенных в пятом столбце.

Из таблицы видно, что различие между ручной и машинной обработками по каждой паре карт составляет от 9 % до 55 %, так что среднее отклонение составляет около 30 %. Таким образом, можно полагать, что соответствие между ручной и машинной обработками по частичным картам составляет около 70 %, что близко к полученному разделу 7 для полной карты значению 57 %.

13. Вариация средней степени порядка

В предыдущем рассмотрении (раздел 12) в качестве сопротивлений, соответствующих различным степеням порядка, использовались значения, полученные в работе [41] для модели блочной структуры. Были приняты нормированные значения сопротивлений: для высокой степени порядка – 1 отн.ед., для средней – 170 отн.ед., для низкой – 5000 отн.ед. Однако принятые так значения сопротивлений можно считать довольно специфическими, так как

они полученными на основе модели блоков. В настоящей работе используется другая модель, а именно, резистивная сетка, поэтому можно полагать, что здесь будет несколько отличный набор сопротивлений. В этом плане представляет интерес оценить возможность вариации набора сопротивлений в широком диапазоне их изменения. В качестве опорных точек возьмем сопротивления при высокой и низкой степенях порядка, то есть 1 отн.ед. и 5000 отн.ед., а сопротивление для средней степени будем варьировать между ними, то есть менять от 1 до 5000 отн.ед. Обратимся к рис. 12, где приведены зависимости полных сопротивлений R_m по каждой из частичных карт P-1 – P-4 (ручная обработка) и M-1 – M-4 (машинная обработка) от величины сопротивления, соответствующего средней степени порядка R_u , меняющегося в указанных пределах.

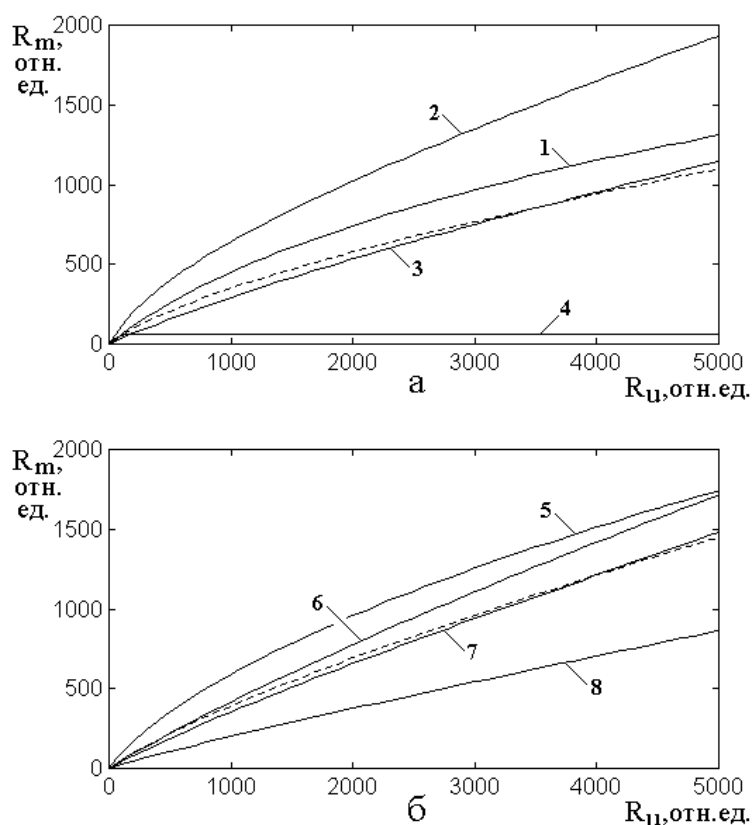


Рис. 12. Вариация средней степени порядка при ручной (а) и машиной (б) обработке для различных частичных карт: 1 – карта P-1; 2 – карта P-2; 3 – карта P-3; 4 – карта P-4; 5 – карта M-1; 6 – карта M-2; 7 – карта M-3; 8 – карта M-4.

Пунктирные линии – средние зависимости по тем и другим картам.

Для удобства наблюдения масштаб кривой 4 по вертикали увеличен в 5 раз.

Сопротивления при высокой и низкой степенях порядка равны 1 отн.ед. и 5000 отн.ед. соответственно.

Из рисунка видно, что характер всех зависимостей примерно одинаков, все они начинаются вблизи нуля и по мере увеличения R_u плавно нарастают, причем скорость роста по мере увеличения R_u постепенно спадает.

Такой рост обусловлен вполне ожидаемым увеличением сопротивления целого (то есть частичной карты в целом) при увеличении сопротивления какой-либо его части (то есть полного числа клеток со средним значением сопротивления R_u). Однако по мере приближения R_u к максимальному значению (5000 отн.ед.) удельный вес такой части относительно полного объема падает, поэтому рост замедляется.

Общий характер кривых вполне отражается подобными зависимостями для усредненных величин, показанных пунктиром. Исключение составляет кривая 4, соответствующая карте Р-4, для которой рост прекращается при R_u где-то около 100 отн.ед., после чего зависимость насыщается и идет далее в виде прямой линии, параллельной горизонтальной оси рисунка. Можно полагать, что такое поведение обусловлено формированием сквозного канала для протекания тока, подобного рассмотренному в разделе 17 работы [45] на рис. 15. В общем случае сопротивление сквозного канала значительно меньше сопротивления окружающих областей, поэтому он обеспечивает для протекания тока наиболее свободную дорогу.

14. Формирование сквозного канала

Рассмотрим этот случай несколько подробнее, для чего обратимся к рис. 13, где приведена схема формирования такого канала.

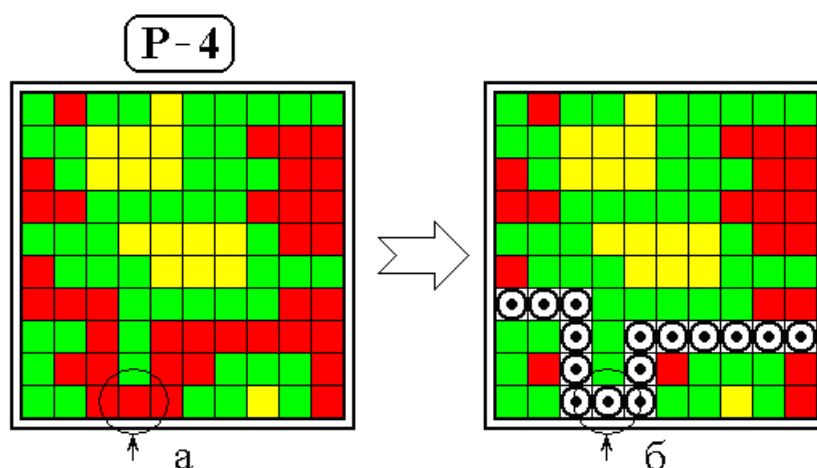


Рис. 13. Схема формирования сквозного канала в частичной карте P-4.
а – исходная карта; б – карта с отмеченным сквозным каналом.

На этом рисунке слева (а) показана исходная частичная карта P-4, расцвеченная подобно показанному на рис. 9а. Сквозной канал образуется в виде непрерывной цепочки из красных клеток, проходящей от левого края карты до правого. Такой канал показан справа, где красные клетки заменены кружками с сердцевинкой. Можно видеть, что такие кружки как раз образуют непрерывную цепь ячеек с малым сопротивлением между крайними сторонами карты. Полное количество ячеек канала равно 15, так что нормированное сопротивление этого канала равно 15 отн.ед. По обе стороны от канала присутствуют ячейки зеленого и желтого цвета, имеющие сопротивления, большие, чем красные, которые в отношении электропроводности подключены к каналу параллельно. Вообще говоря, подключенные параллельно ячейки в какой-то степени могут уменьшить сопротивление канала. Но такое уменьшение будет заметно только до тех пор, пока сопротивление таких включенных параллельно участков будет того же порядка, что и сопротивление канала, то есть не будет превышать 50-100 отн.ед. Если сопротивление параллельных участков заметно больше этой величины, то весь ток через карту пойдет только по сквозному каналу, не ответвляясь в шунтирующие его области, отмеченные зелеными и тем более желтыми клетками. Таким образом, если сопротивление ячеек, соответствующих средней степени порядка (то есть зеленых по рисунку) будет превышать 50-100 отн.ед., то рост зависимости полного сопротивления карты от величины $R_{\text{н}}$ прекратится,

что и дает после небольшого роста преобладающую горизонтальную линию 4 на рис. 12а.

Важно отметить, что разрыв сквозного канала, например, замена какой-либо красной из его ячеек на зеленую или желтую, например четвертую в нижней строке слева, отмеченную окружностью с подведенной снизу стрелкой (рис. 13), при отсутствии обходных путей из красных ячеек, приводит к резкому подъему зависимости R_m от R_u , так что она вместо кривой 4 на рис. 12а приобретает нарастающий вид, подобный кривым 1-3 того же рисунка и занимает близкое к ним место.

Из рассмотрения рис. 9 можно видеть, что никакая частичная карта из там приведенных, кроме P-4, в своем составе сквозного канала не имеет, поэтому все соответствующие кривые на рис. 12 во всем интервале изменения R_u имеют возрастающий характер.

15. Сравнение усредненных сопротивлений частичных карт при ручной и машинной обработке

Рассмотрим теперь усредненные по частичным картам сопротивления этих карт при вариации сопротивления средней степени порядка, для чего обратимся к рис. 14, где кривые 1 и 2 соответствуют пунктирным кривым на рис. 12 и здесь приведены для наглядности сравнения.

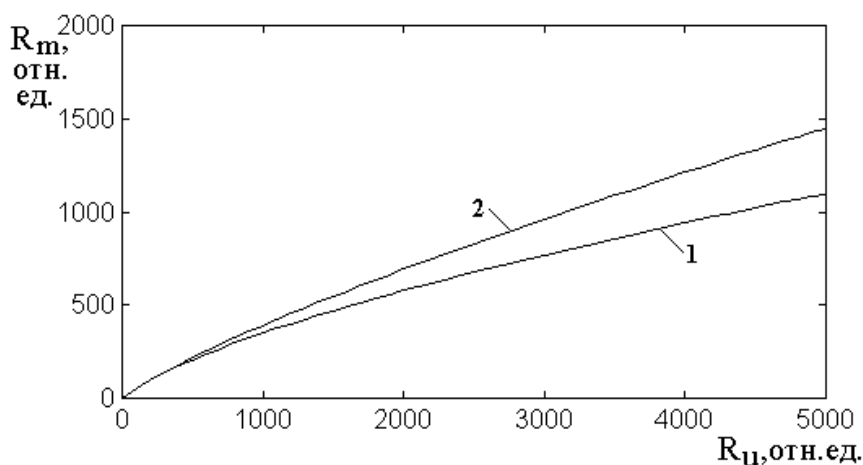


Рис. 14. Зависимости сопротивлений R_m усредненные по всем четырем картам соответствующей обработки от величины сопротивления средней степени порядка R_u : а – обработка ручная; б – обработка машинная.

Из рисунка видно, что характер усредненных кривых, в общем, тот же, что и индивидуальных кривых, причем для кривой 1 (ручная обработка), наличие сквозного канала на карте Р-4 заметного изменения характера этой кривой не производит.

Важным фактором является полное совпадение кривых на участке изменения R_u от нуля до 500 отн.ед. В этот интервал как раз попадает использованное в разделе 12 значение 170 отн.ед, полученное в работе [41], так что здесь соответствие между ручной и машинной обработками довольно хорошее. В пользу такого же соответствия говорит близость приведенных в таблице №4 усредненных значений сопротивлений частичных карт при ручной и машинной обработках, которые равны соответственно 86,59 и 84,30 отн.ед.

Выше значения $R_u = 500$ отн.ед. кривые начинают расходиться и достигают максимального расхождения при $R_u = 5000$ отн.ед., где кривая 1 достигает значения 1070 отн.ед., а кривая 2 – 1450 отн.ед. Среднее значение при этом составляет (1260 ± 190) отн.ед., так что отклонение от среднего не превышает 15 %.

Таким образом, можно полагать, что использование как ручной, так и машинной обработки в среднем дает близкие результаты, которые наилучшим образом согласуются при сопротивлении среднего порядка до 500 отн.ед., а далее различие между обработками не превышает 15 %.

16. Замечание о возможном развитии работы

Приведем некоторые замечания о возможном развитии работы.

Прежде всего следует отметить, что приведенные здесь результаты получены на одном образце с использованием одной карты, полученной методом электронной микроскопии. Главной целью было утверждение возможности использования метода резистивной сетки, в том числе сравнение результатов ручной и машинной обработки. Можно считать, что эта цель, в основном, достигнута, так что метод резистивной сетки получает право на применение.

Однако теперь вопрос стоит об общности полученных результатов, то есть первой проверкой должно быть выполнение исследований на большем числе карт, полученных от одного образца, а также сравнение образцов из различных месторождений.

Что касается метода резистивной сетки, то его желательно обобщить на большее число ячеек, то есть не 10×10 , как в настоящей работе, а хотя бы до 20×20 . Дополнительно следует проверить возможность свертывания четырех частичных карт на сетке размером 2×2 , в том числе установить достаточную объективность такого свертывания.

Весьма важным вопросом следует считать исследование структурного характера распределения слоев графена в образце, в том числе степень однородности такого распределения.

Важным моментом является выяснение степени анизотропии распределения графена в пределах отдельной карты и образца в целом.

Весьма заманчива перспектива использования резистивной сетки как метода локального измерения электрических параметров образца, для чего надо ответить на вопрос, можно ли использовать резистивную сетку в качестве «микроскопа» для определения локальной структуры, а также локальной проводимости и локального сопротивления с точностью до размера отдельной пачки графена.

Заключение

Основные результаты настоящей работы сводятся к следующему.

1) Рассмотрена возможность применения метода трехступенчатой резистивной сетки для анализа проводимости графеносодержащего шунгита по данным растровой электронной микроскопии. Приведена общая структурная характеристика распределения проводящего углерода в шунгите, отмечено наличие графеновых пачек, перемежающихся областями с хаотическим распределением слоев графена. Отмечен неоднородный характер проводимости, обусловленный сильной анизотропией сопротивления слоев графена. Кратко

обсуждены основные методы исследования локального распределения углерода в шунгите, такие как электросиловая микроскопия и растровая электронная микроскопия. Отмечена высокая степень пространственного разрешения электронной микроскопии, позволяющей наблюдать отдельные слои графена и графеновые пачки.

2) Для локальной характеристики распределения углерода на карте, полученной методом электронной микроскопии, предложено использовать структурную дискретизацию такой карты путем наложения сетки с квадратными ячейками, размер которых близок к типичному размеру графеновой пачки. Для характеристики структуры ячейки введен параметр «степени порядка», различающийся по трем градациям: первая – высокая: слои графена почти непрерывны, параллельны друг другу и проходят через значительную часть ячейки; вторая – средняя: слои графена имеют разрывный характер, ориентация слоев произвольная; третья – низкая: четко выраженные слои графена отсутствуют. Предложены два метода определения степени порядка ячеек дискретизированной карты – ручной и машинный. При ручном методе определение степени порядка производится визуально при наблюдении каждой отдельной ячейки через подвижную маску, перемещаемую по всей площади карты. При машинном методе определение степени порядка производится путем анализа изображения каждой ячейки в отдельности, следуя алгоритму вычисления по отдельным пикселям энтропии по Шеннону с помощью графических средств языка Python. Результаты применения обоих методов представлены в виде карт, ячейки которых расцвечены различными цветами, соответствующими определенной степени порядка.

3) Выполнено сравнение результатов ручной и машинной обработки дискретизированной карты. Для этого одна и та же карта была обработана тем и другим способами, на основе чего получена карта совпадений степеней порядка, после обращения которой получена маска, накладываемая на ту и другую исходные карты. При этом открытыми оставались только те ячейки обеих карт, степени порядка которых совпадали. Путем подсчета совпадений на обеих

картах было установлено, что степень соответствия между результатами ручной и машинной обработки составляет около 57 %. Отмечено, что заметное различие между результатами обусловлено технической причиной, связанной с различием измеряемых величин. Так, при ручной обработке степень порядка определяется по структуре графеновых слоев, тогда как при машинной – по степени энтропии по Шеннону, которая может не всегда совпадать со структурой слоев графена. С учетом такого обстоятельства было положено всю дальнейшую обработку проводить двумя методами – ручным и машинным с последующим сравнением получаемых результатов. Выполнено количественная оценка результатов сравнения той и другой обработки. Было установлено, что из общего числа совпадений в 100 % высокая степень порядка составляет 35,5 %, средняя – 47,0 % и низкая – 17,5 %. То есть регулярные слои графена занимают 35,5 % площади всей карты, а полное их отсутствие – 17,5 % той же площади.

4) Для оценки электрических параметров карты было предложено использование метода трехступенчатой резистивной сетки. Приведена общая схема метода, состоящая в первоначальном присвоении каждой ячейке карты определенного значения электрического сопротивления в соответствии с цветовой разметкой, полученной методом дискретизации, после чего такая сетка из сопротивлений с помощью алгоритма Франка-Лобба сворачивается в единый резистор, эквивалентный сопротивлению сетки, то есть всей карты в целом. Приведена схема построения резистивной сетки и последующего ее сворачивания с помощью двух пропагаторов, применяемых к ячейкам сетки последовательно. Рассмотрена методика построения программы машинного алгоритма с формированием массивов из сопротивлений ячеек по отдельности в сочетании с выполнением пропагаторов в виде определенных подпрограмм, приводящая к преобразованию сетки в единый резистор, определяющий сопротивление всей сетки в целом. В конечном результате была получена схема резистивной сетки размером 10x10 ячеек.

5) Для возможности применения метода резистивной сетки к исследуемым картам была выполнена оцифровка расцветочных карт ручной и машинной

обработки, причем в качестве отправного значения сопротивлений ячеек по степеням порядка была принята схема, полученная в более ранних работах на основе модели блочной дискретизации, нормированная на сопротивление чистого углерода. Так, ячейке с высокой степенью порядка было присвоено нормированное значение 1 отн.ед., для ячейки со средней степенью порядка – нормированное значение 170 отн.ед. и для ячейки с низкой степенью порядка – нормированное значение 5000 отн.ед. Для применения метода резистивной сетки размером 10x10 ячеек исходная полная карта, содержащая 20x20 ячеек, была разделена на четыре частичных карты линиями, проведенными через середины противоположных сторон исходного квадрата. В результате было получено 8 частичных карт размером 10x10 ячеек: для ручной обработки 4 карты и для машинной тоже 4 карты, причем пространственное расположение тех и других частичных карт в рамках исходных карт было подобным друг другу. Полученные таким образом 8 частичных карт были оцифрованы в соответствии с тремя степенями порядка.

б) К оцифрованным частичным картам был применен метод резистивной сетки, в результате чего было получено сопротивление каждой из частичных карт по отдельности. На основе анализа сопротивлений по частичным картам было показано, что каждая частичная карта представляет полную карту с максимальным отклонением до 46 % при машинной обработке и с подобным отклонением до 70 % при ручной обработке. При этом из попарного сравнения сопротивлений по тождественно расположенным картам той и другой обработки было установлено, что соответствие между ручной и машинной обработками по частичным картам составляет около 70 %. В то же время было установлено, что среднее значение сопротивления всех четырех частичных карт при ручной обработке и такое же среднее значение четырех карт при машинной обработке совпадают с высокой степенью точности, так что различие между ними не превышает 1,93 %.

7) Для выявления критичности значения нормированной степени порядка к сопротивлению сетки в целом была выполнена вариация этого значения между

крайними величинами от 1 отн.ед до 5000 отн.ед. Были получены зависимости сопротивлений сетки в целом от величины сопротивления средней степени порядка. Установлено, что зависимости для большинства частичных карт по мере увеличения степени порядка имеют возрастающий характер, причем скорость возрастания с ростом степени порядка замедляется, что соответствует обычной тенденции увеличения целого по мере увеличения входящей в него части. На одной из частичных карт выявлено раннее насыщение зависимости общего ее сопротивления от сопротивления степени порядка, устанавливающееся на довольно низком уровне. Показано, что такой характер зависимости обусловлен наличием сквозного канала, образованного следующими непрерывной цепью друг за другом ячейками с малым сопротивлением, так что электрический ток течет по этому каналу, не ответвляясь на соседние ячейки. Установлено, что подобные зависимости, усредненные по всем частичным картам той и другой обработки по отдельности, на начальном этапе увеличения степени порядка вплоть до 500 отн.ед. совпадают с высокой точностью, после чего постепенно расходятся. Отмечено, что использование как ручной, так и машинной обработки в среднем дает близкие результаты, которые наилучшим образом согласуются при сопротивлении среднего порядка до 500 отн.ед, а далее различие между обработками не превышает 15 %.

8) Приведены некоторые замечания о возможном развитии работы. Так, весьма важна статистическая проверка и обобщение полученных результатов на возможно большем количестве образцов шунгита, в том числе полученных из различных природных месторождений. Желательно обобщение метода резистивной сетки на размер 20x20 ячеек и сравнение получаемых результатов с используемым в настоящей работе методом частичных карт. Весьма важным можно считать исследование структурного распределения слоев графена в образце, в том числе степень однородности и анизотропия такого распределения. В качестве возможной задачи отмечено использование метода резистивной сетки

для локального измерения электрических параметров образца с точностью до размера отдельной пачки графена.

Финансирование: Экспериментальное 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», карты структурных элементов ВРЭМ получены в рамках НИР Института геологии им. Н.П.Юшкина ФИЦ Коми НЦ Уцц РАН, теоретическая и статистическая обработка результатов проведена 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., Антоненц 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 минералогия 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 нанобразования 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.B. 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/10.21883/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.01788.2000807i8.0776>
23. Гейм А.К. Случайные блуждания: непредсказуемый путь к графену. // УФН. 2011. Т.181. №12. С.1284-1298.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0181.201112e.1284>

24. 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.
25. 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.
26. Макеева Г.С., Голованов О.А. Математическое моделирование электронноуправляемых устройств терагерцового диапазона на основе графена и углеродных нанотрубок. Пенза: Изд. ПГУ. 2018.
27. 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).
28. Ковалевский В.В. Структура углеродного вещества и генезис шунгитовых пород. // Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Петрозаводск. 2007.
29. 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.
30. 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.
31. Гоулдстейн Д., Яковиц Х. (ред.). Практическая растровая электронная микроскопия. М.: Наука. 1978.
32. Стоянов П.А. Электронный микроскоп. // Физическая энциклопедия. Т5. – М.: Большая Российская энциклопедия. 1998. Стр.574-578.
33. 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. // Журнал радиоэлектроники. 2018. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.8.5>

34. 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. // Журнал радиоэлектроники. 2018. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.8.6>
35. 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. // Журнал радиоэлектроники. 2018. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.9.1>
36. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Представление удельной проводимости графеносодержащего шунгита на основе модели трубок тока. // Журнал радиоэлектроники. 2020. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.3.7>
37. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Применение метода блочной дискретизации для анализа электрической проводимости графеносодержащего шунгита. // Журнал радиоэлектроники. 2021. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.3.3>
38. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Определение электрической проводимости графеносодержащего шунгита с использованием высокоразрешающей растровой электронной микроскопии. // Журнал радиоэлектроники. 2021. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.3.9>
39. 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. // Журнал радиоэлектроники. 2021. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.3.13>

40. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Применение метода независимых каналов для определения электрической проводимости графеносодержащего шунгита. // Журнал радиоэлектроники. 2021. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.6>
41. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Влияние структуры углеродной составляющей графеносодержащего шунгита на его электрическую проводимость. // Журнал радиоэлектроники. 2021. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.18>
42. 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>
43. Антонец И.В., Устюгов В.А., Щеглов В.И. Применение метода вторичной дискретизации для анализа структуры графеносодержащего шунгита по данным растровой электронной микроскопии. // Журнал радиоэлектроники. 2025. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.8.10>
44. Шеннон К.Э. Работы по теории информации и кибернетике. М.: ИЛ. 1963.
45. Антонец И.В., Голубев Е.А., Щеглов В.И. Применение метода резистивной сетки для определения проводимости графеносодержащего шунгита по данным электросиловой микроскопии. // Журнал радиоэлектроники. 2025. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.41>
46. Антонец И.В., Голубев Е.А., Щеглов В.И. Анизотропия локальной проводимости графеносодержащего шунгита по данным электросиловой микроскопии. // Журнал радиоэлектроники. 2026. №1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.1.11>
47. 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. 2023. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.17>

48. 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. 2023. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.18>
49. Antonets I.V., Golubev Ye.A., Shcheglov V.I. Application of the trinary discretization method for the structural analysis of natural disordered sp² carbon. (Manuscript – 16 pages). // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2024. V.32. №3. P.246-253. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2023.2273416>
50. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука. 1964.
51. Левич В.Г. Курс теоретической физики. Т.1. М.: Наука. 1969.
52. Frank D.J., Lobb C.J. Highly efficient algorithm for percolative transport studies in two dimensions. // Phys. Rev. B. 1988. V.37. №1. P.302-307.
53. Булавин Л.А., Выгорницкий Н.В., Лебовка Н.И. Компьютерное моделирование физических систем. Долгопрудный: Изд. Дом «Интеллект». 2011.
54. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Дискретная модель интегральной проводимости графеносодержащего шунгита. // Сборник трудов XXVII Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)». М.: НИУ МЭИ. 2019. С.238-245.

Для цитирования:

Антонец И.В., Голубев Е.А., Щеглов В.И. Применение метода трехступенчатой резистивной сетки для анализа электрической проводимости графеносодержащего шунгита по данным растровой электронной микроскопии // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.4.9>