

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.17>

УДК: УДК 537.874; 537.624

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ТРИНАРНОЙ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛЕРОДА В ГРАФЕНОСОДЕРЖАЩЕМ ШУНГИТЕ**

**И.В. Антонец<sup>1</sup>, Е.А. Голубев<sup>2</sup>, В.Г. Шавров<sup>3</sup>, В.И. Щеглов<sup>3</sup>**

**<sup>1</sup>Сыктывкарский государственный университет им. П.Сорокина,  
167001, Сыктывкар, Октябрьский пр-т, 55**

**<sup>2</sup>Институт геологии им. Н.П.Юшкина Коми НЦ Уро РАН,  
167982, Сыктывкар, ул. Первомайская, 54**

**<sup>3</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,  
125009, Москва, ул. Моховая, 11-7**

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2023 г.

**Аннотация.** Методом высокоразрешающей растровой электронной микроскопии на наноуровне выполнено исследование структурного распределения углерода в природном графеносодержащем шунгите, применяемом для изготовления поглощающих покрытий. Анализ выполнялся на образцах с удельным содержанием углерода – порядка 80-97% и удельной проводимостью от 2200 до 8600 См/м. Результатом измерений явились карты распределения углерода по плоскости образца. Исследовались четыре образца, причем по каждому образцу было снято по пять карт в различных его местах, то есть всего – двадцать карт. Отмечено присутствие на картах графеновых пачек и протяженных многослойных графеновых лент, а также областей с отсутствием четкой графеноподобной структуры. Для анализа локального распределения углерода предложен метод дискретизации карт, состоящий в наложении на плоскость карты сетки с квадратными ячейками и последующим анализом упорядоченности слоев графена по каждой ячейке. Отмечены три уровня упорядочения структуры: высокий, средний и низкий. Для высокого уровня

характерно правильное периодическое распределение слоев графена по всей площади ячейки, для среднего – разрывный характер слоев графена, для низкого – отсутствие слоев графена в пределах всей ячейки. Для индивидуальной характеристики каждого образца введено понятие степени порядка, представляющее собой относительное число ячеек трех уровней, усредненное по всем его картам. Установлено, что в типичном случае высокая степень порядка присутствует на 35,4% площади карты, средняя на 47,3% и низкая на 17,3% той же площади. В качестве возможной причины различия по степени порядка отмечено конкретное геологическое происхождение образцов отдельных месторождений.

**Ключевые слова:** углерод, шунгит, электрическая проводимость.

**Финансирование:** Работа выполнена 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, сходная с каменным углем, но в отличие от последнего, в происхождении которого лежит торф, образовавшаяся на основе нефти [1,2]. Значительные залежи шунгита находятся в приполярной зоне Северного Ледовитого Океана, воды которой богаты морскими водорослями. Главными районами сосредоточения месторождений шунгита являются Карельский перешеек и Новая Земля [3-5]. В основе структуры шунгита лежит углерод, разделенный прослойками кварца. Углерод в общей массе может составлять от 3% до 97% [1-6]

Составляющий основу шунгита углерод обладает высокой электрической проводимостью, поэтому важнейшим практическим применением шунгита является создание покрытий, надежно экранирующих электромагнитное излучение. Поглощающие, пропускающие и отражающие свойства шунгита рассмотрены в работах [6-21]. Основные электродинамические свойства шунгита обусловлены структурой и содержанием входящего в него углерода.

В основе структуры углеродной составляющей шунгита лежит графен [22-26], образующий пачки, ленты и глобулы [6,27-29]. Наиболее ярко проводящие свойства проявляются в высокоуглеродистом шунгите, содержащем 90-97% углеродной составляющей. Опыт показывает, что удельная проводимость шунгита с концентрацией углерода 97%, но получаемого из разных месторождений, может составлять от  $1500 \text{ См м}^{-1}$  (Нигозеро) до  $4000 \text{ См м}^{-1}$  (Максово) и даже до  $9000 \text{ См м}^{-1}$  (Шуньга). Можно полагать, что здесь играет роль структура углеродных образований на наноуровне, исследование которых требует применения высокоразрешающей растровой электронной микроскопии [30,31].

Карты распределения углерода, получаемый этим методом, имеют весьма сложный характер [6,27-29]. Наблюдаются графеновые слои, чередующиеся с некоторой периодичностью в виде темных и светлых полосы, имеющие вид пачек, разорванных кусков или многослойных извилистых лент.

В работах [32-37] предложены различные методы определения удельной проводимости шунгита по его структурным характеристикам, получаемым методом растровой микроскопии.

Однако предложенные методы опробованы на небольшом числе измерений (1-2 карты и отдельные участки карт), не позволяющем судить о статистических характеристиках параметров структуры. В то же время, опыт показывает, что карты, снятые в различных участках одного и того же образца, имеют значительные отличия, обусловленные близким к хаотическому характером распределения углерода. Такое положение затрудняет получение достаточно объективных количественных характеристик.

Настоящая работа направлена на изучение структурных параметров шунгита на основе сравнительного анализа нескольких карт, снятых в различных участках образца. В качестве рабочего инструмента используется метод структурной дискретизации [38-40] по трем уровням. Полученные таким образом данные, будучи подвергнутые статистической обработке, позволяют

оценить структурные характеристики распределения углерода количественным образом [41].

## **1. Приготовление образцов и методика измерения их основных параметров**

Источником происхождения образцов являлись природные месторождения шунгита, географически расположенные на Карельском перешейке (Шуньга, Максово, Зажогоино, Нигозеро, Чеболакша), на Новой Земле (Перья) и в других местах приполярной зоны России.

В первоначальном состоянии образцы представляли собой полученные из месторождений бесформенные куски, размером в 2-3 сантиметра. Для измерений выбирались куски с максимальной структурной однородностью поверхности, что позволяло полагать, что такая же однородность сохраняется по всему объему образца.

Важнейшим критерием отбора образцов для данной работы являлось максимальное содержание углерода.

Для измерений такого содержания использовались обрезки с краев образцов, уничтожение которых в процессе измерения не мешало сохранению основных данных. Использовался метод кулонометрического титрования [41] на экспресс-анализаторе АН-7529М. В основе метода лежит сжигание образца в трубчатой печи с последующим анализом полученного углекислого газа, что позволяет определить содержание углерода по весу в отношении к исходному образцу.

Из всех образцов отбирались те, в которых весовая концентрация углерода составляла 85–97%. Из отобранных таким образом кусков шунгита выпиливались пластины толщиной около 2 мм, которые наклеивались на стекло для последующих измерений. Плоская поверхность образцов тщательно шлифовалась с последующей обработкой методом химической полировки, так что остающиеся неровности не превышали единиц нанометров.

В качестве предварительной характеристики образцов определялась удельная проводимость материала. Измерения проводились четырехконтактным

методом, а для контроля использовался также двухконтактный метод [42,43]. В качестве дополнительной информации использовались данные рентгеноструктурной дифракции, позволяющие определить размеры графеновых пачек и расстояния между составляющими структуру слоями графена [29].

## 2. Основные характеристики образцов

Основные характеристики исследованных образцов приведены в таблице №1. Порядок расположения образцов в таблице соответствует возрастанию удельной проводимости, измеренной четырехконтактным методом.

Таблица №1. Основные характеристики образцов.

№№ обр.	Уд.пров.-4 к. (См/м)	Уд.пров.-2 к. (См/м)	Сод.С (ат. %)	Месторождение
1	2200	1500	85.0	Нигозеро (Карел.)
2	2600	600	90.1	Перья (Нов. Зем.)
3	6600	2500	93.5	Максово (Карел.)
4	8600	8000	88.5	Шуньга (Карел.)

В первом столбце таблицы приведены используемые далее номера образцов. Во втором столбце таблицы – удельная проводимость, измеренная четырехконтактным методом. В третьем столбце – удельная проводимость, измеренная двухконтактным методом. В четвертом столбце таблицы – содержания е углерода в атомных процентах. В пятом столбце таблицы – происхождение образцов, название месторождения.

В настоящей работе за основу измерения проводимости принят четырехконтактный метод, как более информативный и достоверный. Данные в третьем столбце таблицы, полученные двухконтактным методом, приведены для сравнения. Видно, что эти данные, как правило, меньше полученных четырехконтактным методом, причем для образца №2 различие достигает четырех раз. В рамках настоящей работы данные двухконтактного метода далее во внимание приниматься не будут.

Из сравнения удельной проводимости (второй столбец) с содержанием углерода (четвертый столбец) можно видеть, что пропорциональной связи между этими параметрами не наблюдается. В самом деле, проводимость по таблице вниз монотонно возрастает, тогда как концентрация углерода меняется вверх-вниз в произвольном порядке. Проводимость сверху вниз меняется в четыре раза, а изменение концентрации не превышает 5%. Таким образом, корреляция между проводимостью и содержанием углерода отсутствует.

### 3. Методика получения карт распределения углерода

Основное содержание настоящей работы состоит в применении метода высокоразрешающей растровой электронной микроскопии [30,31] для установления структурных параметров шунгита. Используемый в работе электронный микроскоп обеспечивал пространственное разрешение порядка одного нанометра. Результатом являлись карты пространственного распределения углерода с детальным отражением конфигурации графеновых слоев.

Для применения электронной микроскопии из всего массива образца формировался срез размером 10 на 10 мкм, толщиной около 40–50 нм. Схема расположения среза на образце и точек съема карт распределения углерода на срезе показана на рис. 1.

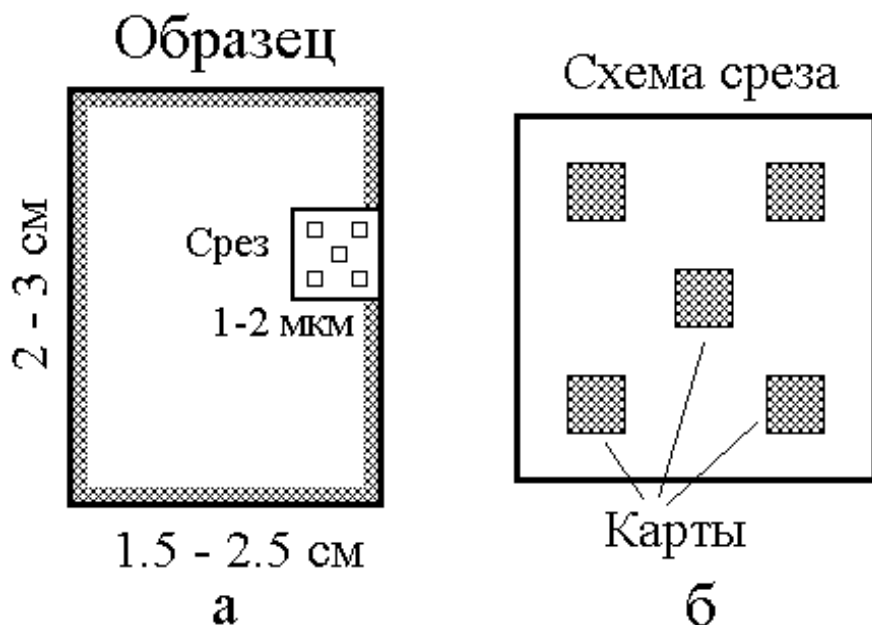


Рис. 1. Схема расположения среза и карт на образце (масштаб условный). а – расположение среза на образце; б – расположение карт на срезе.

На срезе выбирался участок для просвечивания электронным пучком, в пределах которого снимались карты распределения углерода размером 40 на 40 нм. Точки съема карт располагались более или менее равномерно по площади среза для того, чтобы после усреднения сгладить влияние возможной неоднородности образца. Расстояние между точками съема карт составляло порядка 1–2 мкм.

В работе исследовались 4 образца, на каждом из которых было снято по пять карт. Полученные карты подвергались статистической обработке с целью выявления основных структурных параметров материала.

#### 4. Характерные примеры карт

Общий вид получаемых карт иллюстрируется рис. 2. Карты выбраны, исходя из максимальной наглядности изображения из полного набора для двух образцов №2 и №4, достаточно далеко разнесенных по своим значениям проводимости.

**Замечание.** Образец №2 был выбран вместо образца №1, проводимость которого несколько меньше, чем у образца №2, по причине более четкого проявления структуры на картах, обусловленного техническими причинами получения карт. В то же время, проводимость образцов №1 и №2 различается всего на 17%, тогда как проводимость образцов №2 и №4 различается в 3,24 раза, то есть на 324%, так что различие проводимостей между образцами №2 и №4 для демонстрационного анализа можно считать достаточным.

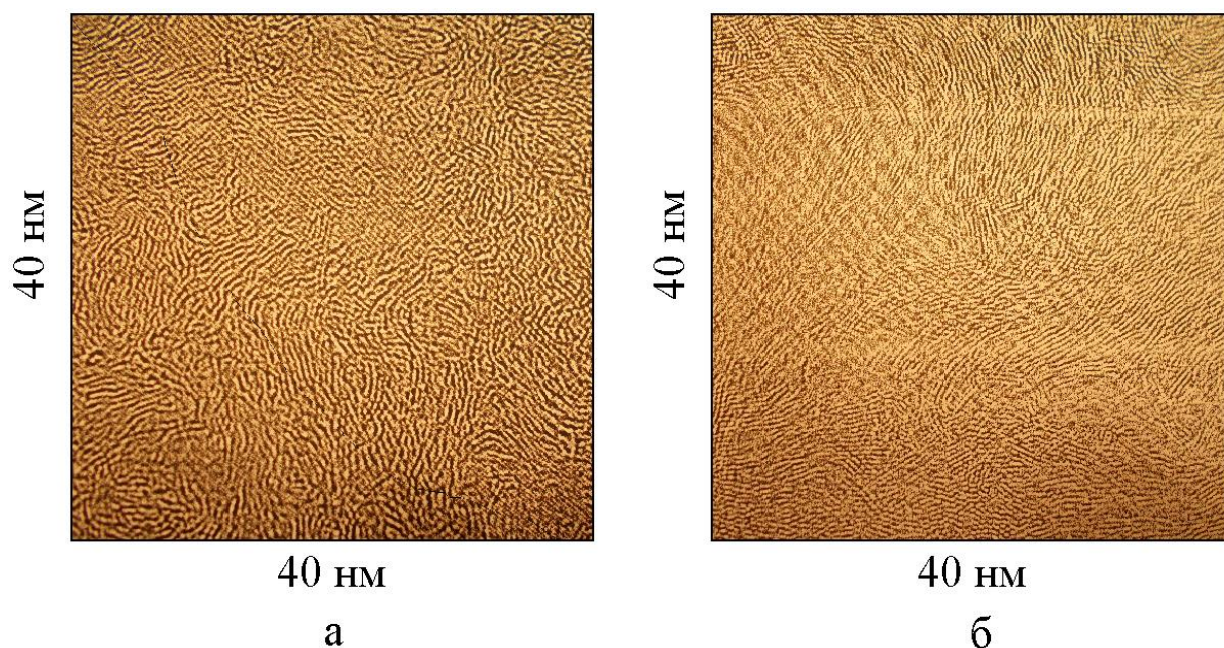


Рис. 2. Типичные карты для образцов из различных месторождений: а – Перья (образец №2, карта №3); б – Шуньга (образец №4, карта №3).

На обеих картах видна достаточно сложная структура. Темные полосы – слои графена, наблюдаемые в торец или около того, светлые – промежутки между ними.

## 5. Сложная структура карт

Исследованные в настоящей работе карты имели довольно сложную структуру. Примеры карт для образцов №2 и №4 представлены на рис. 3. На рисунке контурами обведены некоторые наиболее характерные элементы структуры – графеновые пачки (прямоугольники), протяженные многослойные графеновые ленты (границы лент – длинные изогнутые линии) и области, где видимая структура отсутствует (границы таких бесструктурных областей – округлые кольца).

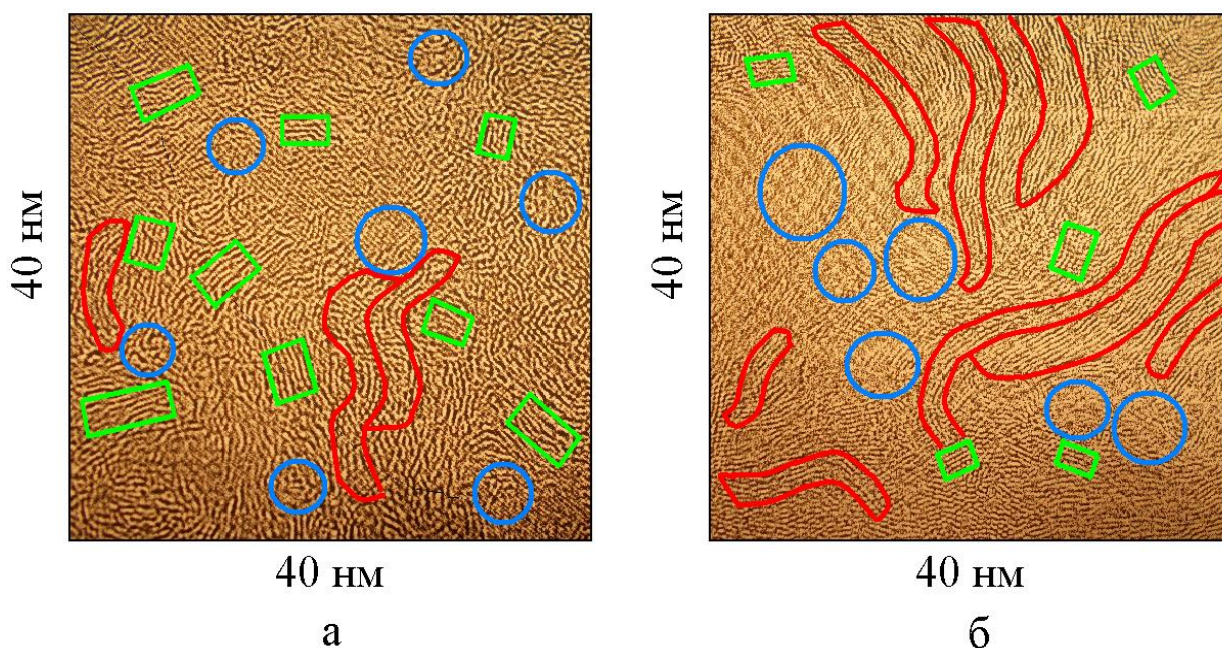


Рис. 3. Типичные элементы структуры карт. а – образец №2, карта №3; б – образец №4, карта №3. Зеленые прямоугольники – графеновые пачки. Голубые кольца – области без структуры; Красные линии – границы графеновых лент. Рисунок воспроизводится по публикации [41]

Из рисунка видно, что в обоих случаях присутствуют области с четко выраженной структурой графеновых слоев – пачки и протяженные ленты, а также области, где четкая структура слоев отсутствует. При этом в образце №2 наиболее выражены короткие пачки, лент мало и бесструктурных областей также мало. В образце №4 наиболее выражены длинные ленты, пачек мало, а бесструктурных областей несколько больше, чем в образце №2.

При этом пачки представляют собой короткие стопки по 5-7 слоев графена, параллельных друг другу, длина которых того же порядка, что и ширина (то есть высота стопки). Ленты – длинные образования, состоящие из параллельных друг другу слоев графена, изгибающиеся довольно сложным образом. То ширине ленты содержат 5–7 слоев графена, иногда больше – до 10 и более. Протяженность лент в несколько раз превышает их ширину и длину пачек, а радиус кривизны извилин составляет от единиц до десятков нанометров.

Кроме этих двух четко выраженных элементов структуры значительную часть карт занимают беспорядочно ориентированные короткие (по 2–5 нм) отрезки графеновых слоев, не образующие друг с другом каких-либо достаточно

протяженных группировок. Из рисунка видно, что таких беспорядочных кусков графена особенно много на карте для образца №2 (а). На карте для образца №4 (б) значительную часть площади занимают ленты, но и беспорядочные нагромождения графеновых слоев также присутствуют.

На площади бесструктурных областей четкие границы графеновых слоев не наблюдаются. Это не означает, что их там вообще нет, ибо карты отражают только поверхностную структуру образцов. В общем случае графеновые пачки и ленты могут существовать по всему объему образца, а на поверхность выходят только какими-то своими частями. Хорошо видны только торцы графеновых слоев, а плоскости уже никак себя не проявляют. В то же время, можно полагать, что в случае, когда лент в объеме много, то и на поверхности их тоже много, а когда мало, то и на поверхности их тоже нет. То же касается графеновых пачек. В рамках настоящей работы авторы не будут вдаваться в подробности распределения графена в объеме образцов, а сосредоточат свое внимание именно на поверхности.

## **6. Ширина полос графена на картах**

Структура более четко просматривается на карте для образца №2 (рис. 2а). Структура на карте для образца №4 (рис. 2б) менее контрастная и более мелкая. Можно полагать, что слабость контрастности для карты «б» обусловлена тем, что микроскоп в этом случае из-за крайне мелкой структуры работает вблизи предела своего разрешения. На карте «а» структура выражена крупнее, в результате чего контрастность получается выше. Однако, несмотря на различие контрастности структура на обеих картах прослеживается довольно явно, так то измерения могут быть проведены с достаточной точностью.

Прежде всего обратим внимание на различие ширины полос на картах. Для получения численных данных была выполнено измерение ширины полос, причем каждая полоса считалась как слой графена и соседний промежуток. Схема определения ширины полос показана на рис. 4, соответствующем фрагменту карты «а» на рис. 2.

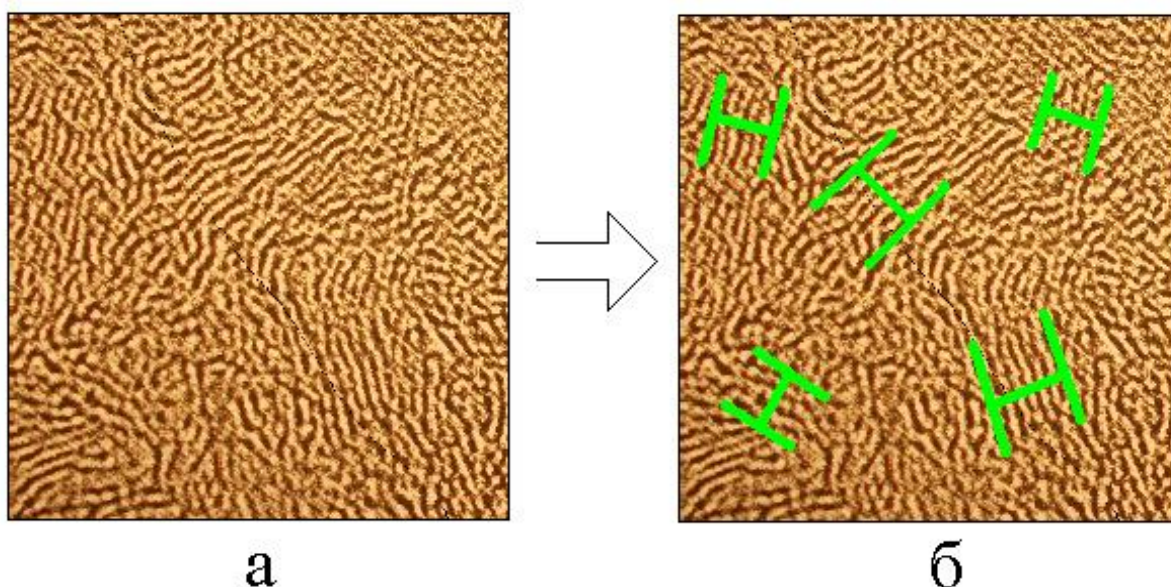


Рис. 4. Схема определения ширины полос по карте. а – исходный фрагмент карты; б – тот же фрагмент с выделенными пачками. Образец №2, карта №3.

Из всей площади карты выбирался небольшой участок, в пределах которого полосы располагались более или менее равномерно параллельно друг другу (пачка из слоев графена). Как правило, удавалось найти участок, содержащий 5–10 полос. По краям участка вдоль полос отмечались границы, показанные зелеными линиями. Измерялось расстояние между этими границами по нормали к ним (как показано соединяющей линией). На этом расстоянии подсчитывалось число полос. Ширина полосы определялась как частное от деления расстояния между границами на число полос. Таких участков на плоскости карты выбиралось несколько по пятиточечной схеме, подобной показанной на рис. 1б (то есть четыре участка вблизи углов карты и пятый на ее середине), после чего проводилось усреднение полученных значений.

Измерения проводились по картам для всех образцов. Из пяти карт для каждого образца выбиралась одна, на вид являющаяся наиболее характерной. Получаемая ширина полос сопоставлялась с теми же данными по рентгеновской дифракции. Результаты измерений ширины полос представлены в таблице №2.

Таблица №2. Ширина полос по картам и по рентгену.

№№ обр.	Ширина полос по картам (нм)	Ширина полос по рентгену (нм)
1	$0.405 \pm 0.095$	0.352
2	$0.400 \pm 0.025$	0.348
3	$0.382 \pm 0.015$	0.349
4	$0.362 \pm 0.010$	0.347

Из таблицы видно, что по мере увеличения номера образца ширина полос, измеренная по картам и по рентгену уменьшается, то есть те и другие результаты имеют общую тенденцию к уменьшению. Уменьшение по картам составляет около 10.5%, уменьшение по рентгену – около 1.5%. То есть можно полагать, что измерение по картам обладает большей чувствительностью, чем измерение по рентгену. В то же время, данные по картам превышают данные по рентгену в среднем на 9.7%, что, по-видимому, связано с различием методики измерений, то есть рентген «чувствует» слои графена как-то не так, как электронный микроскоп, по-видимому, из-за того, что рентген просвечивает образец насквозь, а микроскоп снимает карты с его поверхности.

Для обоих методов измерения общим является тот факт, что структура на карте образца №2 (рис. 2в) более крупная, чем на карте образца №4 (рис. 2б). В то же время, из рис. 2 видно, что слои графена на карте №2, хотя и частично сгруппированы в пачки, но все же довольно короткие и расположены беспорядочным образом, тогда как те же слои на карте №4 выстроены в длинные ленты на значительном протяжении, сохраняющие плотную структуру. Таким образом, можно считать, что слои графена на карте №4 упакованы значительно плотнее, чем на карте №2. Можно полагать, что более плотная упаковка прижимает слои графена друг с другом сильнее, чем беспорядочное их расположение. Поэтому структура на карте №4 получается более мелкой, чем на карте №2.

## 7. Дискретизация карты

Для дискретного анализа структуры на карту размером  $40 \times 40$  нм накладывалась квадратная сетка, размер ячеек которой составлял  $2.5 \times 2.5$  нм. Всего по ширине и высоте карты получалось по 16 ячеек. Размер ячеек был выбран, исходя из типичного размера графеновой пачки – 2–4 нм с числом слоев 4–5 слоев (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.

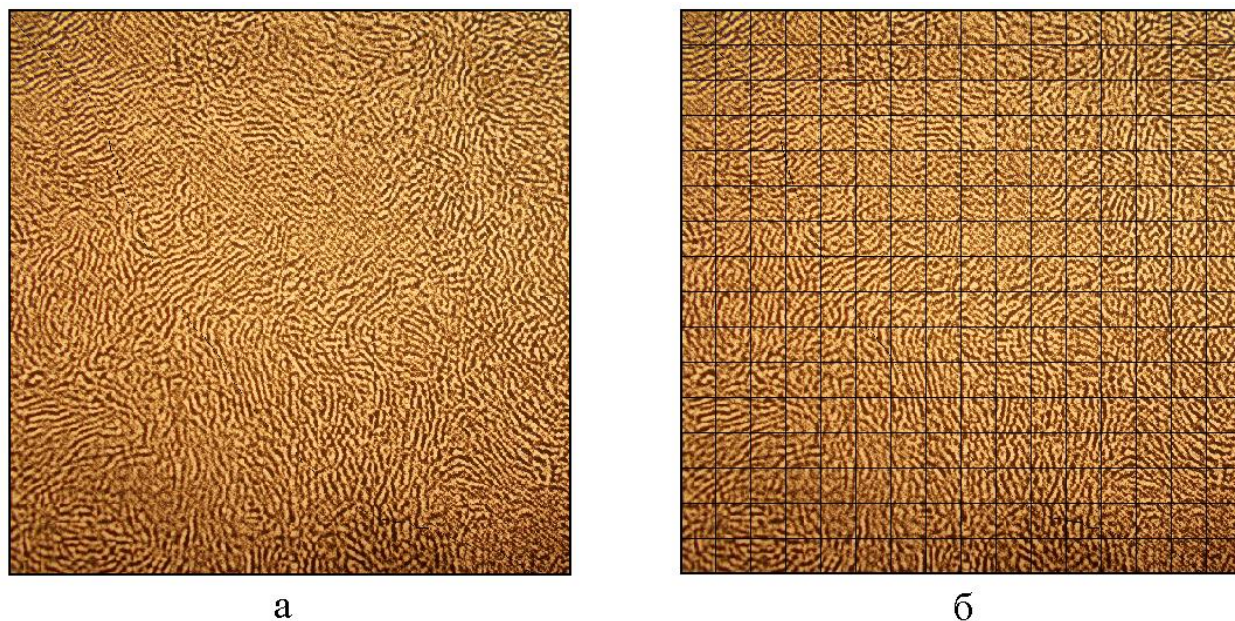


Рис. 5. Схема наложения сетки на карту. Слева (а) – исходная карта, справа (б) – карта с наложенной сеткой. Образец №2 карта №3. Рисунок воспроизводится по публикации [41].

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.

Схема определения степени однородности ячеек карты показана на рис. 6. Слева в трех рядах приведены по пять типичных примеров наблюдаемых на картах ячеек, соответствующих отмеченным выше трем градациям однородности. Справа приведены соответствующие этим градациям условные обозначения в цвете.

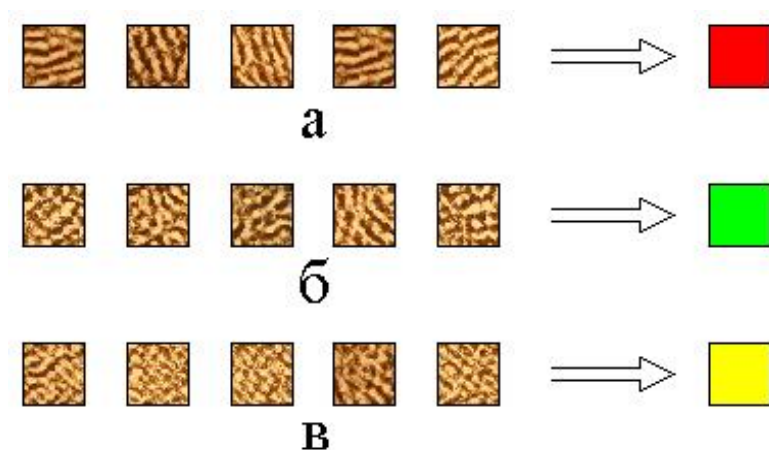


Рис. 6. Степень однородности структуры в пределах ячеек сетки: а – высокая; б – средняя; в – низкая. Слева показаны примеры вариантов структуры, справа – соответствующее условное обозначение ячейки сетки.

На полной карте ячейки заполнялись условными цветами по степени однородности в соответствии с обозначениями, приведенными на рис. 6.

Поскольку здесь ячейки заполняются тремя условными обозначениями (цветами), то дискретизированную таким способом карту будем называть «тринарной» по аналогии с «бинарной» картой, дискретизированной только по двум позициям [38-40].

## 8. Техника процесса дискретизации

В процессе дискретизации карты ячейки сетки заполнялись путем визуального анализа. Для этого 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 обозначением, показанным в правом столбце на рис. 6.

## 9. Пример дискретизированной карты

Пример получаемой в результате тринарной дискретизации карты показан на рис. 7.

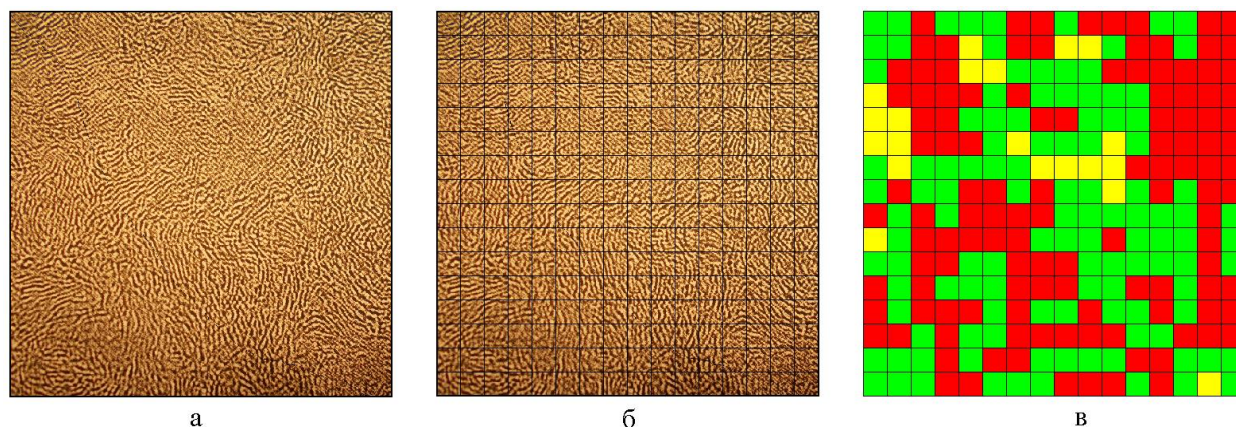


Рис. 7. Пример дискретизации карты по тринарной схеме. а – исходная карта; б – карта с наложенной сеткой; в – дискретизированная карта. Образец №2, карта №3. Рисунок воспроизводится по публикации [41]

Из рисунка видно, что в результате дискретизации исходная карта с кажущимся беспорядочным рисунком заменяется на карту, в которой области, соответствующие различной степени упорядоченности структуры, выделены полностью четким образом, доступным для численного анализа.

## 10. Корректность визуального анализа

Описанный в предыдущем разделе метод дискретизации карты основан на визуальной оценке степени однородности единичных ячеек карты. Однако крайняя сложность наблюдаемой структуры карт затрудняет получение полностью объективных результатов. В самом деле, как можно видеть из рис. 6,

различие между примерами соседних горизонтальных рядов невелико и может допускать некоторые разночтения. Чтобы исключить или хотя бы уменьшить степень влияния субъективного фактора, в настоящей работе дискретизация карт проводилась повторно с усреднением полученных результатов. Пример влияния субъективного фактора показан на рис. 8. Для простоты рисунка приведена не вся карта, а ее верхняя половина, иллюстрирующая существо дела в достаточной степени. На рисунке сверху (а) показана исходная карта, посередине (б) – результат первой дискретизации. Внизу (в) показана та же карта, дискретизированная повторно.

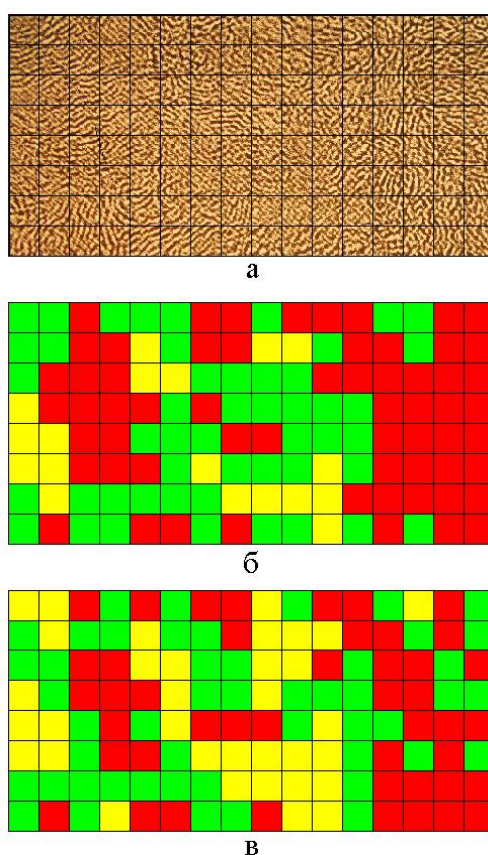


Рис. 8. Результат двукратной дискретизации карты. а – исходная карта; б – первая дискретизация; в – вторая дискретизация.

Из рисунка можно видеть, что вторая и третья позиции, хотя они и получены из одной и той же карты, однако заметно различаются. Заметное сходство есть, но оно не является достаточно полным.

Таким образом, возникает задача выявления степени сходства и следующая из нее численная оценка достоверности получаемых результатов.

## 11. Анализ по третьей строке

Рассмотрим теперь, в какой степени результаты двух измерений соответствуют друг другу. Последовательность получения данных покажем на примере третьей строки карты, представленной на рис. 5б.

Обратимся к рис. 9, где в последовательных шагах показана схема сравнения дискретизации карты по двум измерениям на примере одной строки. Сверху представлена исходная строка в начальном виде с наложенной сеткой. Далее левый столбец соответствует первому измерения, а правый – второму. Для снижения помех от соседних ячеек маска в обоих случаях маска накладывалась не вплотную ячейку за ячейкой, а через одну ячейку, то есть сначала в качестве первого ряда (то есть при первом проходе маски слева направо) рассматривались ячейки с нечетными номерами, в качестве второго (то есть при втором прохождении маски) – с четными номерами. При этом ячейки, которые пропускались в том и другом рядах, перечеркнуты. Полученные последовательности ячеек в первом и втором рядах затем складывались, образуя непрерывную строку, непрерывно дискретизированную. Далее дискретизированные строки располагались одна под другой и сравнивались данные по одноименным ячейкам, которые помещались в расположенную ниже обобщающую строку. Если данные по двум строкам совпадали, то ячейка обобщенной строки отмечалась тем же знаком, если эти данные были различны, то ячейка обобщенной строки обозначалась нулем. Таким образом, количество нулей в обобщенной строке по отношению к полному количеству ячеек в исследуемой строке давало степень несоответствия данных двух измерений. Так, в приведенной внизу на рис. 9 обобщенной строке количество нулей равно 5, а полное количество ячеек – 16, то есть степень достоверности получаемых результатов равна  $(16-5)/16 = 0,6875$ , то есть около 69%.

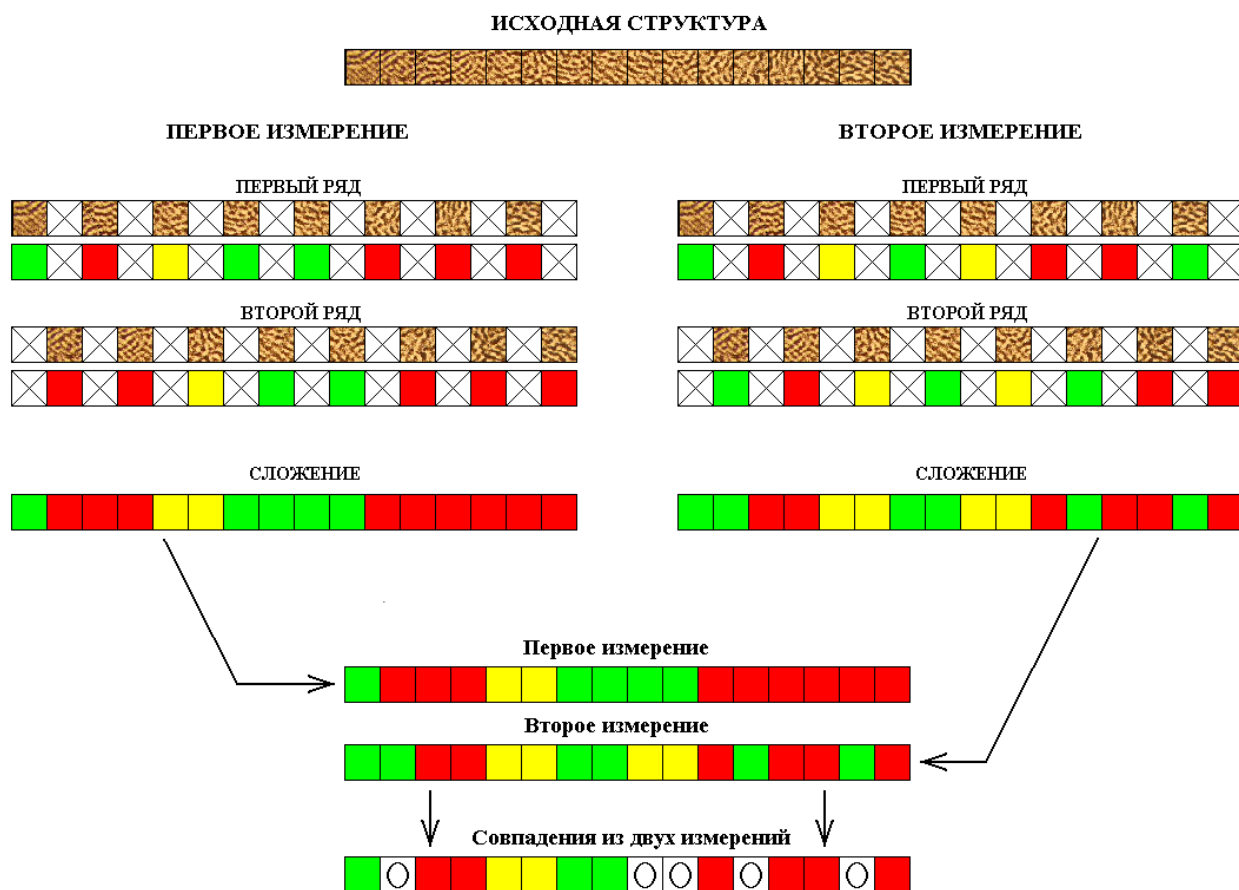


Рис. 9. Схема сравнения дискретизации карты по двум измерениям на примере одной строки. Образец №2, карта №3, строка третья. Рисунок воспроизводится по публикации [41]

## 12. Анализ по восьми строкам

Рассмотрим теперь сравнение дискретизации карты по двум измерениям на примере большего числа строк, в качестве которых возьмем первые восемь строк того же образца, то есть его верхнюю половину. Можно полагать, что такой выбор, то есть половина карты, отражает общую картину в достаточной степени и в то же время позволяет избежать избыточного количества довольно громоздких вычислений.

Обратимся к рис. 10, где показана схема сравнения дискретизации карты по двум измерениям на примере восьми строк. Здесь в двух столбцах показаны результаты сравнения из двух измерений по последовательным строкам сверху вниз. Каждая отдельная группа ячеек, принадлежащая одной строке, содержит результаты двух измерений, отмеченные слева цифрами 1 и 2, а также

обобщенную строку, отмеченную буквой С. Совпадение ячеек регистрируется так же, как на рис. 8, то есть нули означают отсутствие совпадения.

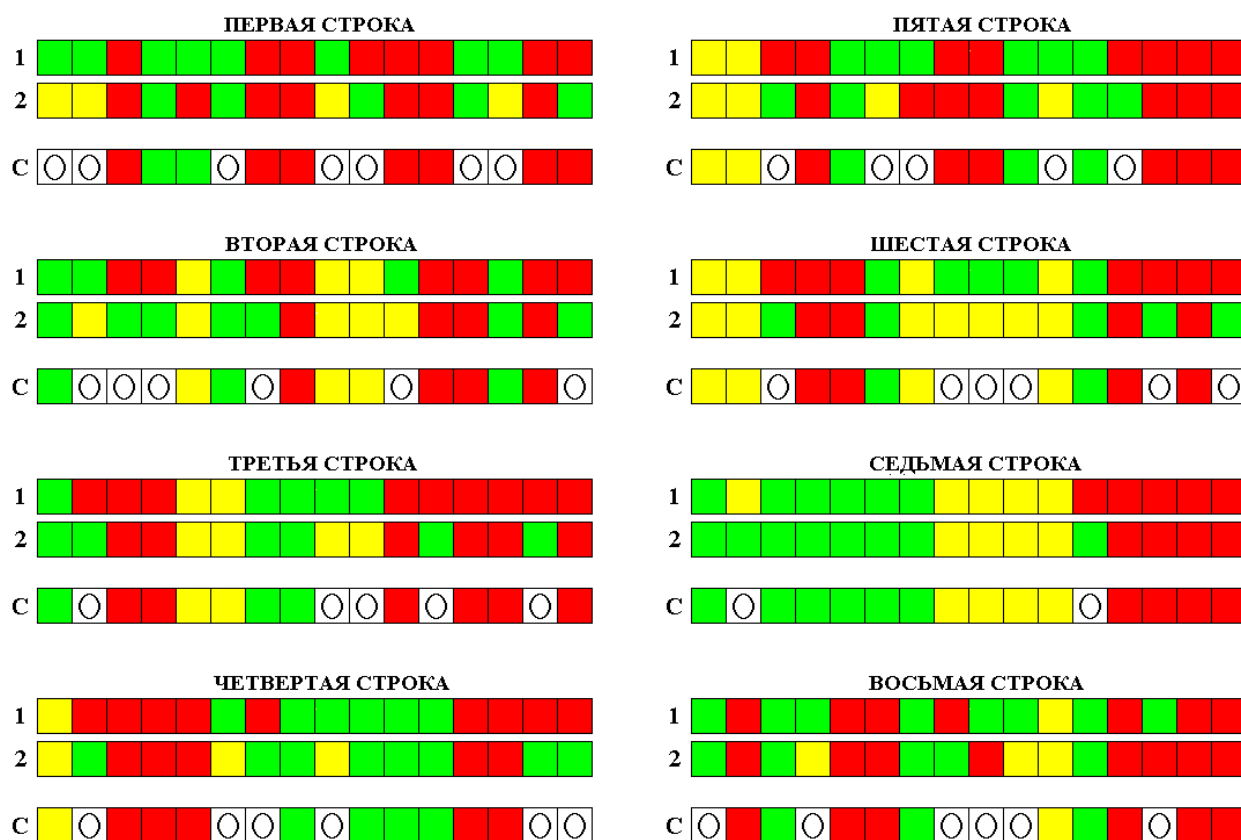


Рис. 10. Схема сравнения дискретизации карты по двум измерениям на примере восьми строк. Образец №2, карта №3, первые восемь строк.

Результаты измерений представлены в таблице №3.

Таблица №3. Результаты сравнения дискретизации по двум измерениям на восьми строках.

№№ строк	Степень порядка			Полное число совпадений
	Высокая (красные)	Средняя (зеленые)	Низкая (желтые)	
1	7	2	0	9
2	4	3	3	10
3	6	3	2	11
4	5	4	1	10
5	6	3	2	11

6	4	2	4	10
7	4	6	4	14
8	6	3	1	10
Средние	$5.25 \pm 1.09$	$3.25 \pm 1.20$	$2.12 \pm 1.36$	$10.62 \pm 1.41$

В первом столбце таблицы приведены номера рассматриваемых строк. Во втором, третьем и четвертом – результаты совпадений по двум измерениям для ячеек с соответствующими степенями порядка. В пятом столбце приведено полное количество совпадений по каждой строке карты. В последней строке таблицы приведены средние количества совпадений по каждой степени порядка, а также среднее значение числа совпадений по каждой строке, усредненное по всем строкам.

Полнее число ячеек в одной строке карты равно 16, а число совпадений значений порядка в ячейках по одной строке равно  $10.62 \pm 1.41$ . То есть относительное число совпадений равно  $(10.62 \pm 1.41)/16 = 0.6637 \pm 0.088$ , то есть около 66%.

Для контроля такое же измерение было проведено по первым восьми строкам карты №3 образца №4, проводимость которого превышает проводимость образца №2 более чем в три раза. Результаты измерений дали значение  $0,6562 \pm 0,1683$ , то есть также около 66%.

Таким образом, можно полагать, что степень достоверности результатов, получаемых на основе дискретизации карты, составляет около 66% и от величины проводимости не зависит, что ввиду крайне сложной структуры исходных карт можно считать вполне приемлемым.

### 13. Карты, дискретизированные по трем уровням порядка

Перейдем к рассмотрению дискретизации карт по всем образцам. На рис.11 показаны карты, полученные путем дискретизации по трем уровням порядка: высокому (красные), среднему (зеленые), низкому (желтые), определяемым в соответствии с градациями, показанными на рис. 6. Каждый

горизонтальный ряд на рисунке соответствует одному образцу. Представлены карты по четырем образцам, параметры которых приведены в таблице №1.

По каждому образцу приведено по пять карт. Для их нумерации введены обозначения, состоящие из двух цифр. Первая цифра соответствует номеру образца. В каждом горизонтальном ряду карт на рисунке эта цифра одинаковая. Вторая цифра соответствует номеру карты в пределах данного образца. На рисунке в каждом горизонтальном ряду эта цифра меняется от единицы до пяти. Дискретизация карт проведена по одному измерению. Приведенные в разделах №4, №5 на рис. 2 и рис. 3 исходные карты соответствуют дискретизированным картам №23 и №43. Техника дискретизации, описанная в разделах №7, №8, проиллюстрирована на карте №23. Проведенное в ходе проверки дискретизации в разделе №10 первое измерение выполнено на карте №23.

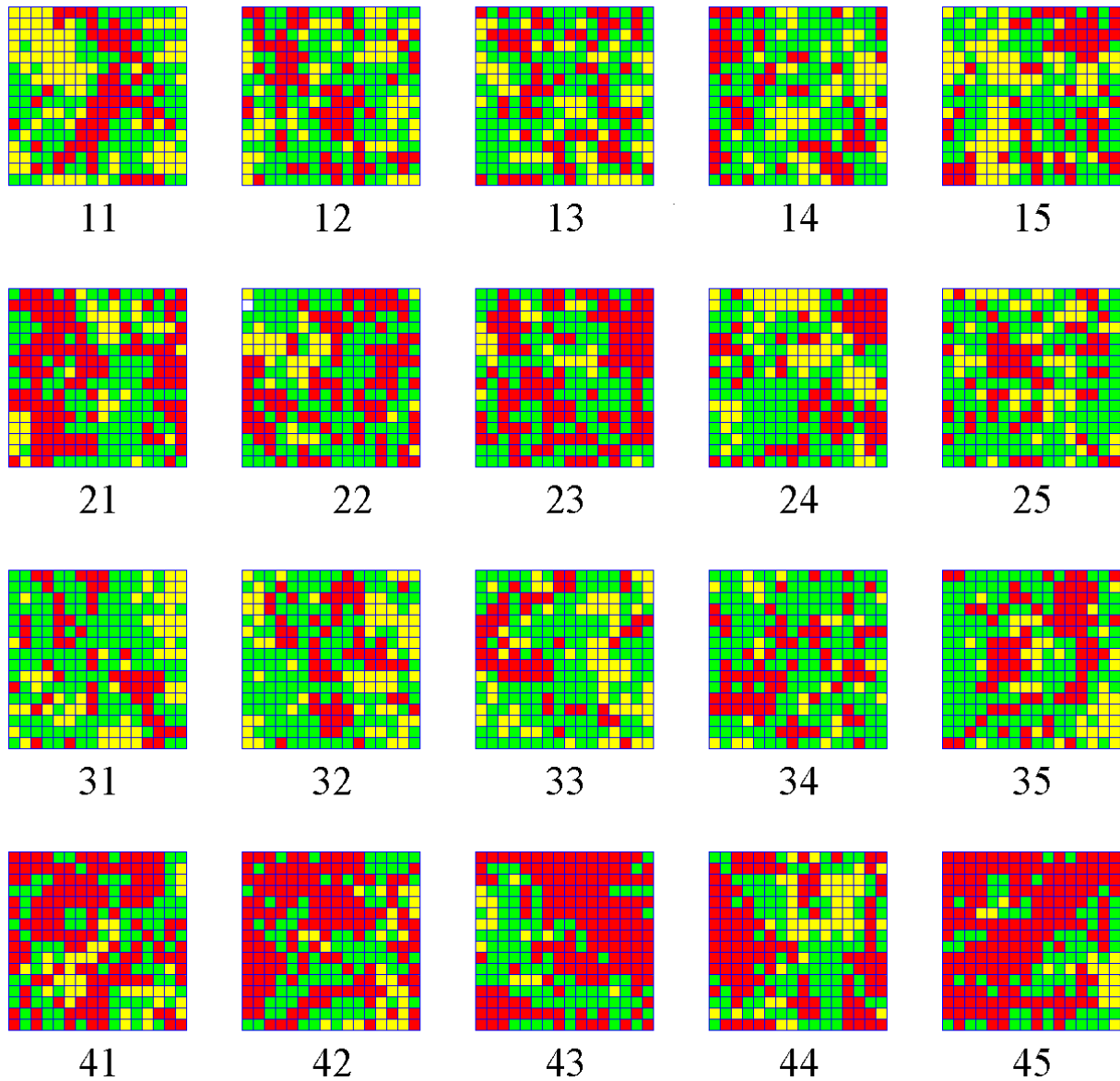


Рис. 11. Карты, полученные в результате дискретизации по трем уровням.  
 Номера карт: первая цифра – номер образца, вторая цифра – номер карты.  
 Рисунок воспроизводится по публикации [41]

Из рисунка можно видеть, что ячейки карт, соответствующие различным уровням порядка, перемешаны почти хаотическим образом. В то же время, можно заметить, что по каждому ряду количество красных ячеек близко друг к другу, тогда как по рядам эти количества заметно различаются. Так, из нижнего ряда (карты 41–45) видно, что на всех его картах преобладает красный цвет, тогда как во втором снизу ряду (карты 31–35) красного цвета значительно меньше, а преобладает зеленый. В верхних двух рядах (карты 11–15 и 21–25) количество красных ячеек приближается к количеству зеленых.

## 14. Количественные характеристики карт

Для того, чтобы навести на видимое разнообразие определенную систему, рассмотрим число ячеек того или иного цвета, приходящихся на каждую отдельную карту. В таблице №4 приведены количества ячеек с различной степенью порядка по всем картам.

Таблица №4. Количества ячеек с различной степенью порядка по картам.

Номера образцов	Номера карт	Степень порядка		
		Высокая (красные)	Средняя (зеленые)	Низкая (желтые)
1	11	62	113	81
	12	74	127	55
	13	71	128	57
	14	65	138	53
	15	68	115	73
2	21	117	197	32
	22	108	115	33
	23	121	115	29
	24	72	126	58
	25	63	145	48
3	31	53	148	32
	32	57	136	33
	33	52	141	20
	34	71	158	58
	35	48	168	48

4	41	132	89	35
	42	141	88	27
	43	151	91	14
	44	114	99	43
	45	167	72	17

В первом столбце таблицы приведены номера образцов. Во втором столбце – номера дискретизированных карт, в третьем – количество ячеек с высокой степенью порядка (красных), в четвертом – количество ячеек со средней степенью порядка (зеленых) и в пятом – количество ячеек с низкой степенью порядка (желтых).

Из таблицы видно значительное разнообразие числа ячеек на отдельных картах, однако теперь этому разнообразию поставлено в соответствие определенное число.

Обратимся теперь к таблице №5, где приведены количества ячеек, усредненные по картам для каждого образца. Для получения таких значений из таблицы №4 для каждого образца выбирался столбец, соответствующий определенной степени порядка, после чего по данным этого столбца вычислялось среднее арифметическое значение и квадратичное отклонение от среднего

Таблица №5. Количество ячеек с различной степенью порядка, усредненная по картам для каждого образца.

Номер образца	Степень порядка		
	Высокая (красные)	Средняя (зеленые)	Низкая (желтые)
1	$68.0 \pm 4.2$	$124.2 \pm 9.2$	$63.8 \pm 11.1$
2	$96.2 \pm 24.0$	$121.6 \pm 13.2$	$38.2 \pm 13.30$
3	$56.2 \pm 7.9$	$150.2 \pm 11.6$	$49.6 \pm 14.1$
4	$141.0 \pm 17.8$	$87.8 \pm 8.8$	$27.2 \pm 10.8$

В первом столбца таблицы приведены номера образцов, Во втором, третьем и четвертом – количества ячеек, соответствующие высокой, средней и низкой степеням порядка.

Для более объективного сравнения степеней порядка по образцам, выполним нормировку данных, для чего отнесем количества ячеек того и другого вида к полному числу ячеек на карте, равному 256. Полученные результаты приведены в таблице №6.

Таблица №6. Относительные значения степени порядка для каждого образца.

Номер образца	Степень порядка		
	Высокая (красные)	Средняя (зеленые)	Низкая (желтые)
1	$0.266 \pm 0.016$	$0.485 \pm 0.036$	$0.249 \pm 0.043$
2	$0.376 \pm 0.094$	$0.475 \pm 0.052$	$0.149 \pm 0.052$
3	$0.219 \pm 0.031$	$0.587 \pm 0.045$	$0.194 \pm 0.055$
4	$0.551 \pm 0.069$	$0.343 \pm 0.034$	$0.106 \pm 0.042$

В первом столбца таблицы приведены номера образцов, Во втором, третьем и четвертом – относительные количества ячеек, соответствующие высокой, средней и низкой степеням порядка.

Из таблицы можно видеть, что усредненные значения степени порядка по отдельным образцам отличаются друг от друга на величины, превышающие квадратичные отклонения. Можно полагать, считать, что наиболее типичными для шунгита являются значения, усредненные по всем образцам. Такие усредненные значения приведены в таблице №7.

Таблица №7. Усредненные по всем образцам значения степени порядка.

Единицы измерения	Степень порядка		
	Высокая	Средняя	Низкая
Нормированные	$0.353 \pm 0.052$	$0.472 \pm 0.042$	$0.174 \pm 0.048$
Процентные	35,4%	47,3%	17,3%

В первом столбце таблицы приведены наименования единиц измерения степени порядка, во втором, третьем и четвертом – усредненные значения степени порядка, в первой строке – нормированные, во второй – те же, выраженные в процентах.

Из полученных данных можно заключить, что наиболее типичным для шунгита из различных месторождений является средняя степень упорядоченности (47,3%), достаточно большой – высокая степень (35,4%) и довольно малой – низкая степень упорядоченности (17,3%).

Из сравнения с таблицей №6 можно видеть, что наиболее близко к этим значения подходит образец №2, для которого отклонение от средних значений, по высокой степени составляет около 6,5% вверх, по средней степени – 0,6% вверх, по низкой – на 14,3% вниз. Более подробно отклонения от средних значений для всех образцов приведены в таблице №8.

Таблица №8. Отклонения значений степени порядка от средней величины по всем образцам.

Номер образца	Отклонение от среднего значения (%)		
	Высокая (красные)	Средняя (зеленые)	Низкая (желтые)
1	– 24.6	+ 2.7	+ 43.1
2	+ 6.5	+ 0.6	– 14.3
3	– 38.0	+ 24.3	+ 11.5
4	+ 56.1	– 27.3	– 39.1
Средние по столбцу (из абс.вел.)	31.3	13.7	27.0

В первом столбце таблицы приведены номера образцов и обозначение усредненного по столбцу абсолютного значения отклонения. Во втором, третьем

и четвертом столбцах – соответствующие отклонения и средние значения отклонений по всем степеням порядка.

Из таблицы можно видеть, что минимальным отклонением обладает образец №2, а максимальным – образец №4. В среднем наибольший разброс по отклонениям составляет 31.35 и имеет место для высокой степени порядка. Приближается к этому значению разброс для низкой средней степени порядка (27.0%) и наименьшим является разброс по средней степени порядка (13.7%). То есть можно полагать, что наиболее типичной для всех шунгитов является средняя степень упорядоченности.

Можно полагать, что различие как по степени упорядоченности, так и по отклонению от среднего значения обусловлено геологическим происхождением образцов, взятых из разных месторождений.

## **Заключение**

Основные результаты настоящей работы сводятся к следующему.

Работа посвящена исследованию структурного распределения углерода в графеносодержащем шунгите, получаемым из различных месторождений приполярной зоны Северного Ледовитого океана. Для выявления структуры распределения углерода на наноуровне использовался метод высокоразрешающей растровой электронной микроскопии.

Для анализа были отобраны образцы с высоким удельным содержанием углерода – порядка 80–97%, которое контролировалось методом кулонометрического титрования. В качестве вспомогательного параметра измерялась удельная проводимость образца методом четырех контактов. Приведена методика приготовления образцов для применения высокоразрешающей растровой электронной микроскопии.

Исследовались четыре образца из месторождений Карельского перешейка (Нигозеро, Максово, Шуньга) и Новой Земли (Перья), содержание углерода в которых составляло 85-93%, а удельная проводимость от 2200 до 8600 См/м. Результатом измерений явились карты распределения углерода по плоскости

образца. По каждому образцу было снято по пять карт в различных его местах, то есть всего – двадцать карт.

Отмечено проявляющееся на картах присутствие графеновых пачек и протяженных многослойных графеновых лент, а также областей с отсутствием четкой графеноподобной структуры. Выявлено близкое к периодическому локальному распределению углерода, обусловленное чередованием слоев графена. Отмечено некоторое различие периода расположения графеновых слоев, связанное с характером структуризации углерода в виде коротких графеновых пачек и протяженных графеновых лент. Установлено, что при наличии лент период распределения графена меньше, чем в их отсутствие на величину порядка 10%.

Для анализа локального распределения углерода предложен метод дискретизации карт, состоящий в наложении на плоскость карты сетки с квадратными ячейками и последующим анализом упорядоченности слоев графена по каждой ячейке.

Отмечены три уровня упорядочения структуры высокий, средний и низкий. Для высокого уровня характерно правильное периодическое распределение слоев графена в одном направлении по всей площади ячейки, для среднего – разрывный характер слоев графена с хаотически меняющейся ориентацией, для низкого – отсутствие наблюдаемых слоев графена в пределах всей ячейки.

Регистрация степени упорядоченности производилась методом визуализации с использованием подвижной маски, позволяющей выделить отдельную ячейку. Для выявления корректности визуального метода была выполнена проверка совпадения результатов по двум повторным измерениям. Сравнение результатов выполнено как по одной строке карты, так и по совокупности соседствующих строк, по площади составлявших половину карты. Установлено соответствие повторных измерений со степенью достоверности полученных результатов 66-69%, не зависящей от удельной проводимости исследуемого образца.

Выполнена статистическая обработка всех полученных карт. Отмечено, что общим свойством карт является близкое к хаотическому смешанное распределение ячеек с тремя уровнями упорядоченности по всей площади карты. Для характеристики каждой отдельной карты определено количество ячеек каждого из трех уровней, присутствующих на данной карте. В качестве независимого численного параметра введено относительное число ячеек того или другого уровня упорядоченности, нормированное на полное число ячеек карты.

Для индивидуальной характеристики каждого образца введено понятие степени порядка, представляющее собой относительное число ячеек трех уровней, усредненное по всем его картам. Установлено, что усредненные значения степени порядка по отдельным образцам отличаются друг от друга на величины, превышающие их квадратичные отклонения от среднего.

В качестве наиболее типичных для шунгита в целом приведены значения степени порядка, усредненные по всем образцам. Установлено, что в типичном случае высокая степень порядка присутствует на 35,4% площади карты, средняя на 47,3% и низкая на 17,3% той же площади. Определены отклонения степени порядка по отдельным образцам от среднего типичного значения. Установлено, что наиболее типичной для всех исследованных образцов является средняя степень упорядоченности, для которой отклонение не превышает 13%, тогда как при высокой достигает 31%. В качестве возможной причины различия, как по степени порядка, так и по отклонению от среднего, может являться геологическое происхождение образцов отдельных месторождений.

**Финансирование:** Работа выполнена 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 минерогенез 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.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.
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.
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.
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.
  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. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar20/7/text.pdf>
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. <http://jre.cplire.ru/jre/mar21/3/text.pdf>
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. <http://jre.cplire.ru/jre/mar21/9/text.pdf>
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. <http://jre.cplire.ru/jre/mar21/13/text.pdf>
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. <http://jre.cplire.ru/jre/jun21/6/text.pdf>
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. <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/8/text.pdf>
38. 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.  
<http://jre.cplire.ru/jre/aug18/5/text.pdf>
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 2. Дискретность структуры. // Электронный «Журнал радиоэлектроники». 2018. №8.  
<http://jre.cplire.ru/jre/aug18/6/text.pdf>
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 3. Удельная проводимость. // Электронный «Журнал радиоэлектроники». 2018. №9.  
<http://jre.cplire.ru/jre/sep18/1/text.pdf>
41. 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. 2023.  
<https://doi.org/10.1080/1536383X.2023.2273416>
42. Воробьева Л.А. Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС. 2006
43. Антонец И.В., Котов Л.Н., Некипелов С.В., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Электродинамические свойства тонких металлических пленок с различной толщиной и морфологией поверхности. // Радиотехника и электроника. 2004. Т.49. №10. С.1243-1250.
44. Антонец И.В., Котов Л.Н., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Проводящие и отражающие свойства пленок нанометровых толщин из различных металлов. // Радиотехника и электроника. 2006. Т.51. №12. С.1481-1487.

#### Для цитирования:

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>