

## СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ КЛАСТЕРОВ С ФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ

**А. В. Белко, А. В. Никитин**

*Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,  
Гродно, Беларусь, [belko\\_av@grsu.by](mailto:belko_av@grsu.by)*

Проведена сегментация АСМ-изображений кластеров золота, полученных экспериментально при напылении в вакууме на диэлектрические подложки, и полученных методами оптической микроскопии снимков поверхности композиционного материала на основе тетрафторэтилена с кластерами меди. Структура кластеров золота и кластеров наполнителя-меди согласуется со структурой фрактальных кластеров, сформированных с помощью модели RLA.

**Ключевые слова:** порог сегментации; метод Отсу; кластеры; фрактальная размерность; модель RLA.

## SEGMENTATION OF IMAGES OF CLUSTERS WITH FRACTAL STRUCTURE

**A. V. Belko, A. V. Nikitin**

*Yanka Kupala State University of Grodno,  
Grodno, Belarus, [belko\\_av@grsu.by](mailto:belko_av@grsu.by)*

Segmentation AFM images of gold clusters obtained experimentally by vacuum deposition on dielectric substrates and optical microscopy images of the surface of a composite material based on tetrafluoroethylene with copper clusters was performed. The structure of gold clusters and filler-copper clusters is consistent with the structure of fractal clusters formed using the RLA model.

**Keywords:** segmentation threshold; Otsu method; clusters; fractal dimension; RLA model.

### 1. Введение

Существует достаточно большое количество автоматических методов сегментации, которые зависят от конкретных задач сегментации. Одним из наиболее простых методов нахождения подходящего порога состоит в том, чтобы определить каждый из пиков гистограммы (локальные максимумы функции распределения точек изображения по яркости), а затем найти точку перехода (минимум) между ними. Этот метод известен под названием ватершета (или метод выделения долин) [1], и позволяет во многих случаях определять несколько порогов.

Очень часто используются также мультиспектральные методы определения порогов. Основой этих методов является разбиение гистограммы на ряд распределений с заранее определенной формой. Наиболее часто используемым вариантом является разложение гистограммы по гауссовым распределениям. Порог определяется в точках пересечения этих распределений [2].

Очень популярными являются также методы перебора порогов, при которых определяется оптимальный порог по определенным условиям. Одним из самых распространенных из них это метод Отсу. Сущность этого метода состоит в том, чтобы выбрать порог, который минимизирует отношение объединенной дисперсии к дисперсии между классами, определяемыми разбиением гистограммы на пороги [1].

Ряд теоретических и экспериментальных исследований, направленных на получение информации об оптических свойствах поверхностей с различной геометрией шероховатости, включая сложные фрактальные системы, показывают, что сильно флуктуирующие поля в масштабно-самоподобных объектах (например, фрактальные кластеры наночастиц благородных металлов) могут значительно превышать внешнее возбуждающее поле. Поэтому возникает необходимость в детальном изучении фрактальной структуры кластеров, а также ее влияние на физические свойства этих поверхностей [3].

При изготовлении дисперсно-наполненных полимерных композитов часто происходит агрегация частиц наполнителя в более крупные агрегаты. Процесс агрегации частиц наполнителя во многом определяет структуру и свойства композиционного материала. Теория фракталов применяется также для описания структуры наполнителя и структуры полимерной матрицы в композитных материалах [4]. Для количественного описания структуры фрактальных объектов используется фрактальная размерность. Фрактальная размерность может быть одним из параметров, который устанавливает связь между структурой физических объектов и их физическими свойствами.

В работе проведено исследование пространственного распределения частиц кластеров, определенных в результате сегментации по АСМ-изображениям островковых пленок золота и по снимкам поверхности, полученным методами оптической микроскопии, композиционного материала на основе тетрафторэтилена с наполнителем из меди, и определение количественных характеристик структуры кластеров в рамках модифицированной модели RLA.

## **2. Основная часть**

Методы сегментации позволяют выделить физические объекты (кластеры) по изображениям островковых пленок золота, полученным при напылении в вакууме на поверхность диэлектрических подложек [3]. По-

лученное методами атомно-силовой микроскопии изображение поверхности размером 512x512 точек покрывается двухмерной решеткой аналогичной размерности. Поверхность представляется в виде системы двух уровней: нижнего и верхнего. Для этого каждой ячейке решетки присваивается одно из двух состояний: занято (верхний уровень) или пусто (нижний уровень). Ячейка решетки считается занятой, если высота в соответствующей точке снимка больше среднего значения, в противном случае ячейка решетки считается свободной. Занятые ячейки либо изолированы друг от друга, либо образуют группы (кластеры), состоящие из ближайших соседей (рис. 1). Таким образом, формируются кластеры, структура которых определяется взаимным расположением занятых ячеек. Покажем, что структуру наблюдаемых кластеров можно описать методами фрактальной геометрии [3].

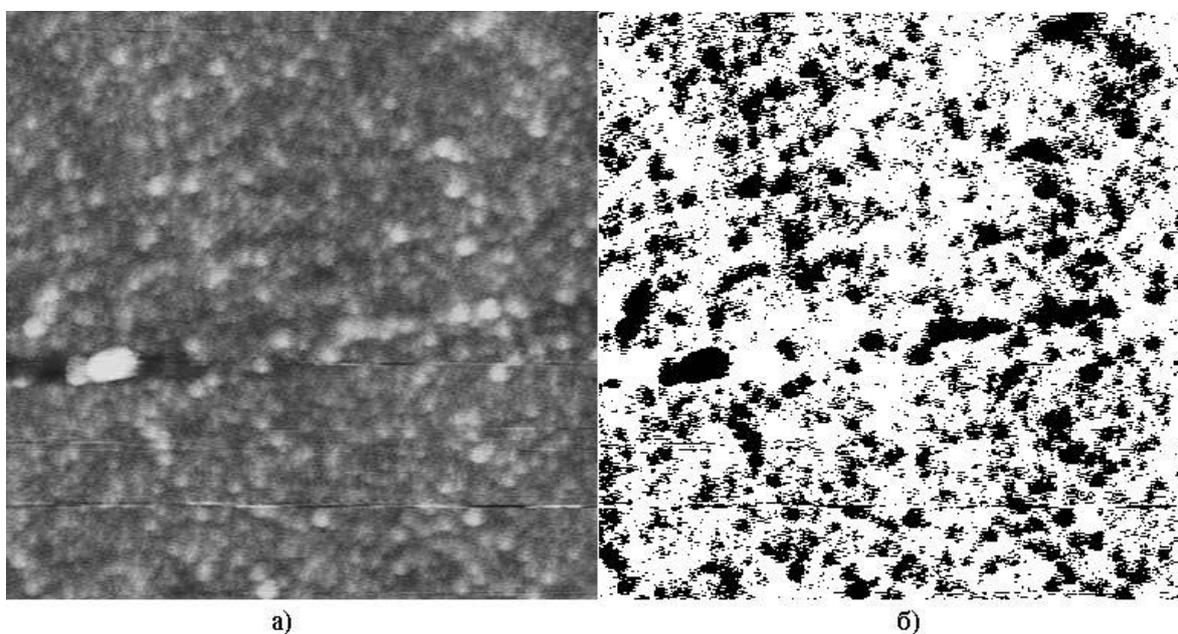


Рис. 1. АСМ – изображение поверхности кластеров золота на подложке (а); система кластеров (б)

Построение зависимостей натурального логарифма числа частиц от натурального логарифма размера кластеров показывает, что эти зависимости, построенные для каждого кластера в отдельности близки к линейным, что позволяет считать структуру отдельных кластеров фрактальной. Информативной характеристикой структуры кластерной системы является средняя фрактальная размерность кластеров системы.

Средняя фрактальная размерность кластеров, образованных при напылении со скоростями 2 и 6 Å/с показывает, что размерность кластеров системы в обоих случаях равно 1,6 [3].

При увеличении температуры подложки структура кластеров на поверхности подложки уплотнялась и при температуре 200 °С фрактальная размерность увеличивается до значения 1,8. Дальнейшее увеличение температуры до 270 °С приводит к тому, что график зависимости натурального логарифма числа частиц от натурального логарифма размера объекта для системы кластеров перестает быть линейным [3].

Как показывают расчеты, значение средней фрактальной размерности кластеров, полученных при различных условиях вакуумного напыления (скорости напыления, температуры подложки), соответствует фрактальной размерности кластеров, полученных при компьютерном моделировании в соответствии с моделью RLA (reaction-limited aggregation – ограниченная реакцией агрегация).

В рамках модифицированной модели RLA можно рассчитать пространственное расположение частиц кластеров в кластерной системе. В соответствии с модифицированной моделью RLA в ходе процесса кластеризации в случайном порядке добавляются затравочные частицы, которые не перемещаются по области. Также в ходе процесса кластеризации, как и в рамках модели RLA, последовательно запускаются частицы, которые диффундируют по области. Если диффундирующая частица попадает в ячейку рядом с каким-либо кластером, то в зависимости от вероятности прилипания, она либо присоединяется к кластеру, либо продолжает диффундировать по области. Таким образом, можно построить кластерную систему. Информативной характеристикой фрактальных кластеров системы в этом случае может стать их средняя фрактальная размерность.

Для определения количественных параметров структуры кластеров меди в матрице политетрафторэтилена необходимо выделить эти объекты на снимках поверхности, полученных методами оптической микроскопии. Наиболее подходящим методом нахождения порога сегментации из выше рассмотренных для определения кластеров меди в матрице политетрафторэтилена композиционного материала по снимкам поверхности является метод Отсу [4].

Полученные снимки представляются в цветовом пространстве RGB. В этом случае каждая точка снимка представляется в виде трех составляющих цвета красного R, зеленого G, синего B. В качестве количественной характеристики, для которой определяется порог по методу Отсу, является разница между R и остальными составляющими цвета G и B. Если разница между красным цветом R и зеленым G или синим B превышает пороговое значение, то данная точка снимка интерпретируется как точка, относящаяся к кластерам меди (рис. 2–3). В противном случае она относится к матрице политетрафторэтилена. Полученное таким образом усредненное значение по всем снимкам значение порога равно 17.

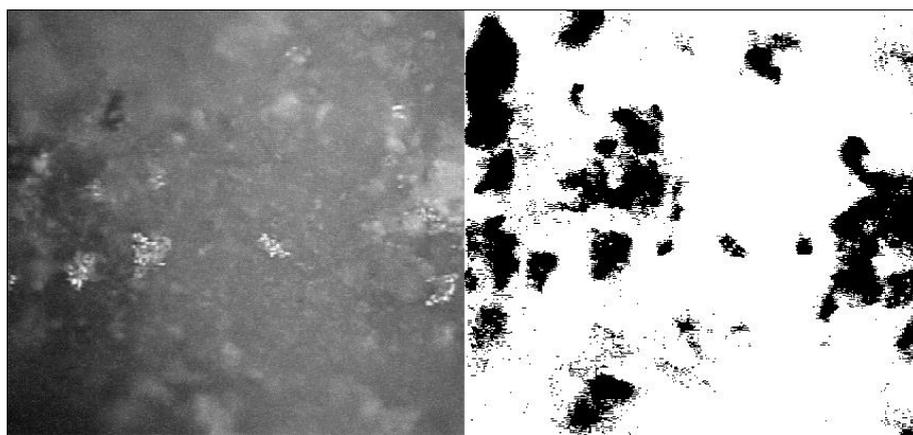


Рис. 2. Выделение кластеров меди (массовая концентрация 10%)

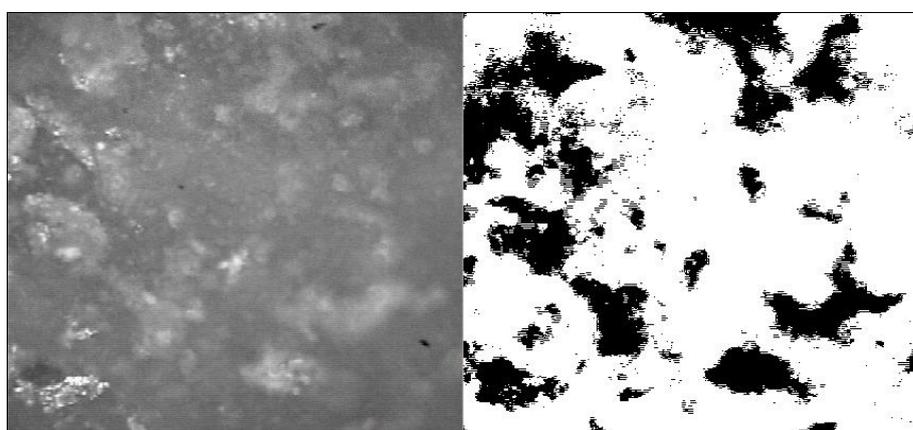


Рис. 3. Выделение кластеров меди (массовая концентрация 20%)

Геометрические характеристики структуры кластеров меди можно определить, используя методы фрактальной геометрии. Одной из таких характеристик является фрактальная размерность. По полученным снимкам определить массовую фрактальную размерность кластеров меди не представляется возможным, однако эти снимки кластеров меди позволяют определить фрактальную размерность профиля поверхности кластеров. Под профилем поверхности кластера понимаем проекцию поверхности кластера на плоскость.

Фрактальные размерности профиля выделенных сегментов кластеров наполнителя в матрице политетрафторэтилена находятся в пределах от 1,65 до 1,72 при изменении массовых концентрации меди от 1 до 20%. Увеличение массовой концентрации наполнителя от 1 до 20% приводит к образованию более рыхлой структуры поверхности кластеров наполнителя [4].

Проведен анализ структуры фрактальных кластеров, сгенерированных в рамках модели RLA. Фрактальные размерности профиля кластеров, структура которых рассчитана в рамках модели RLA (для трехмерных решеток), изменяются от 1,62 до 1,72 при изменении вероятности прилипания

диффундирующей частицы и частиц кластера в зоне прилипания от 0,2 до 1. Полученные результаты количественно соответствуют расчетам для выделенных сегментов кластеров наполнителя в матрице политетрафторэтилена при массовых концентрациях меди от 1 до 20%. Такой параметр модели RLA, как вероятность прилипания, может служить связующим звеном между фрактальной размерностью профиля кластеров и его массовой фрактальной размерностью. Массовая фрактальная размерность изменяется от 2,32 до 2,42 при изменении вероятности прилипания от 0,2 до 1.

Расчеты выполнялись в ресурсном центре «СКИФ» Гродненского государственного университета имени Янки Купалы на суперкомпьютерном кластере «IBM FlashSystem 240 cluster». В работе была выполнена оценка эффективности расчета распознавания кластеров меди в матрице политетрафторэтилена композиционного материала по снимкам поверхности, полученным методами оптической микроскопии, на распределенных вычислительных системах. Для проведения расчетов с применением параллельных вычислений использовалась библиотека TPL (Task Parallel Library).

Для оценки эффективности расчета на распределенной вычислительной системе был проведен вычислительный эксперимент по формированию фрактальных кластеров в дисперсной системе с использованием от 1 до 12 вычислительных узлов.

Получена зависимость времени расчета от количества вычислительных узлов (рис. 4). Установлено, что оптимальное время расчета соответствует количеству 5–6 вычислительных узлов.

Для расчета, проведенного с использованием 5–6 вычислительных узлов, время расчета уменьшается в 5–6 раз по сравнению с расчетом на 1 вычислительном узле. Полученные данные коррелируют с законом Амдала.

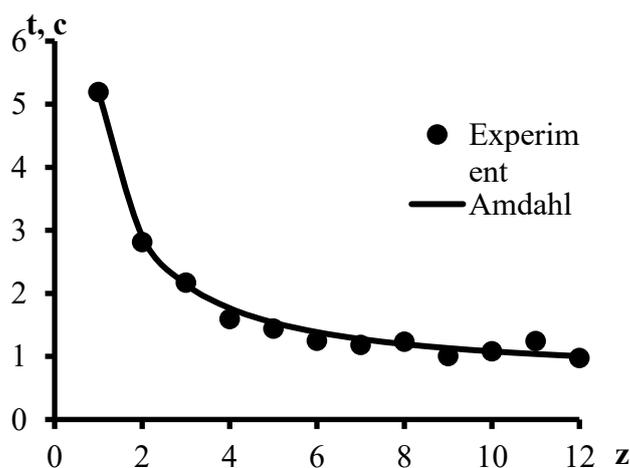


Рис. 4. Зависимость времени расчета от количества вычислительных узлов

### 3. Заключение

Проведена сегментация АСМ-изображений кластеров золота, полученных экспериментально при напылении в вакууме на диэлектрические подложки при температурах подложки 20 °С, 150 °С, 200 °С и скорости напыления золота 2 Å/с, 6 Å/с. Структура фрактальных кластеров, сформированных с помощью модифицированной модели RLA, согласуется со структурой кластеров золота для значений фрактальной размерности от 1,6 до 1,8.

На основе полученных методами оптической микроскопии снимков и разработанного алгоритма в соответствии с методом Отсу проведен анализ и определено распределение кластеров меди в матрице политетрафторэтилена при массовых концентрациях наполнителя от 1 до 20%. Фрактальные размерности профиля выделенных сегментов кластеров наполнителя в матрице политетрафторэтилена увеличиваются от 1,65 до 1,72. Анализ структуры распределения частиц меди в полимерной матрице показывает, что наполнитель образует кластеры, структуру которых можно описать в рамках модифицированной модели RLA.

### Библиографические ссылки

1. *Абламейко С. В., Недзьведь А. М.* Обработка оптических изображений клеточных структур в медицине. Мн. : ОИПИ НАН Беларуси, 2005.
2. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М. : Техносфера, 2005.
3. Фрактальная структура кластеров золота, образованных при напылении в вакууме на диэлектрические подложки / А. В. Белко [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 5. С. 11–15.
4. Diagnostics of the structure of fractal copper clusters in a polytetrafluoroethylene matrix / A. V. Belko [et al.] // Pattern Recognition and Image Analysis. 2020. Vol. 30, iss. 1. P. 1–6.