

DOI: 10.7242/1999-6691/2016.9.3.30

УДК 539.25

МНОГОУРОВНЕВЫЙ АНАЛИЗ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДАМИ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Н.И. Ужегова¹, А.Л. Свистков^{1,2}¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация*²*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Российская Федерация*

Атомно-силовая микроскопия позволяет получать информацию о структуре исследуемого материала и его локальных механических характеристиках на наномасштабе. Далее ее можно использовать для анализа макроскопической однородности (качества смешения с наполнителем) нанокompозитов, механические свойства которых напрямую зависят от распределения частиц наполнителя по объему. Поэтому важно уметь правильно определять агрегаты частиц наполнителя на рельефах поверхности материала. С этой целью предложена методика, в основе которой лежит представление исходного изображения как суммы нескольких рельефов. Выделение объектов заданного характерного размера на криволинейной поверхности осуществляется с помощью линейного пространственного фильтра осреднения, учитываемого специальным образом. Каждый из выделенных таким образом рельефов содержит объекты определенного размера и может исследоваться отдельно. Поэтому данную процедуру предлагается называть многоуровневым анализом или многоуровневой визуализацией. В частности, рассмотрено разделение исходного изображения рельефа поверхности на три составляющих: рельеф с объектами высокой кривизны поверхности, рельеф малой кривизны и рельеф с объектами промежуточной кривизны поверхности. Методика предназначена для изучения нанокompозитов, созданных с применением наполнителя зернистого типа. Ее эффективность показана на примере модельной поверхности, разработанной таким образом, чтобы имело место максимальное соответствие поверхности реальных материалов. Выявлены параметры, влияющие на точность выделения объектов. Даются рекомендации по практическому применению предложенной методики к анализу экспериментальных данных, установленных методом атомно-силовой микроскопии.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, рельеф поверхности, агрегаты частиц наполнителя, структура материала, многоуровневый анализ

MULTILEVEL ANALYSIS OF THE RELIEF OF A SURFACE SAMPLE OBTAINED BY ATOMIC FORCE MICROSCOPY TECHNIQUES

N.I. Uzhegova¹ and A.L. Svistkov^{1,2}¹*Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation*²*Perm State University, Perm, Russian Federation*

Atomic force microscopy is used to study the structure of a material and its local mechanical properties on the nanoscale. This information can be applied to analyze the macroscopic homogeneity nanocomposites (quality of mixing with filler), the mechanical properties of which depend directly on the distribution of filler particles throughout the material. Hence, it is necessary to identify filler particle aggregates visible on the surface of a sample. For this purpose, a technique capable of identifying objects of a specific size on the curved surface is proposed. The method is based on the decomposition of the initial topographic image into the sum of several reliefs using a linear averaging spatial filter. Each relief is identified so that it contains certain-size objects and can be analyzed separately. It is suggested that this procedure be called multilevel visualisation or multilevel analysis. This paper is focused on the decomposition of the initial topographic image into three components: relief with objects of high curvature surface, low curvature relief and relief with objects of medium curvature surface. The technique is intended to study nanocomposites created using granular filler. The efficiency of the developed method has been verified by testing a specially designed surface, which is much like as the real surface of the material analyzed by AFM. Parameters affecting the accuracy of object identification are determined. Recommendations for practical application of the multilevel visualisation to the analysis of experimental data are given.

Key words: AFM, surface relief, filler particle aggregates, material structure, multilevel analysis

1. Введение

Полимеры и композиты, полученные на их основе, широко используются в различных областях современной промышленности. Это огромный класс разнообразных по физико-механическим и химическим свойствам материалов. В настоящее время одно из наиболее перспективных направлений дальнейшего улучшения их механических и эксплуатационных характеристик связано с созданием наноструктурированных материалов с применением нового класса наполнителей (нанотрубок, графена, нанодIAMазов и другого). Это требует надежных и достоверных сведений как о структуре материала на наномасштабе, так и о его локальных механических свойствах. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) является одним из наиболее информативных инструментов, позволяющих изучать и то, и другое [1–3].

Свойства нанокompозитов напрямую зависят от распределения по объему наполнителя, поэтому важно научиться выделять его частицы на поверхности исследуемого материала. Для этого при измерениях можно взять за основу изображение рельефа поверхности материала, фазовый сдвиг колебаний кантилевера микроскопа, возникающий из-за взаимодействия зонда с поверхностью материала, или карту

распределения адгезии [4]. Между этими параметрами нет однозначной зависимости. Это может быть связано с тем, что частицы наполнителя покрыты эластомером. В данной работе рассматривается метод выделения частиц наполнителя на рельефе поверхности.

Современное программное обеспечение обладает широким спектром возможностей анализа изображений поверхности: путем визуализации данных, определением площадей и объемов, измерением шероховатости и так далее. При этом методы обработки и визуализации данных, установленных с помощью АСМ, постоянно развиваются вслед за расширением области приложения.

В первую очередь после получения рельефа поверхности исследуемого образца приступают к исключению шумов и выбросов, которые искажают информацию о реальной поверхности материала. Для этой цели разработано множество фильтров и алгоритмов, многие из которых уже включены в программное обеспечение атомно-силового микроскопа или в специальные программы обработки изображений [5–7]. Так как рельеф поверхности представляет собой двумерную матрицу, то чаще всего используют пространственные фильтры. Процесс фильтрации подразумевает обработку изображения в каждой точке с помощью специальных операторов. В качестве операторов выступают прямоугольные или квадратные матрицы, которые обычно называют маской фильтра, окном или ядром интегрального преобразования [8–10]. Согласно такой процедуре в каждой точке вычисляется новое значение по определенному закону, зависящему от вида фильтра.

Наиболее популярными являются сглаживающие линейные фильтры, для которых характерно нахождение среднего значения элементов матрицы в области, задаваемой маской фильтра, поэтому их еще называют срединными фильтрами. Широко распространены также нелинейные пространственные фильтры. Чаще всего при обработке изображений, полученных с помощью АСМ, применяется медианный фильтр. Суть этого фильтра заключается в определении в каждой рассматриваемой точке медианного значения тех элементов изображения, которые попали в область, ограниченную размером окна фильтра.

Перед сканированием поверхности образца часто прибегают к ее предварительной механической обработке для уменьшения шероховатости. Следствием такого процесса становятся достаточно глубокие царапины. Для выявления и исключения таких линейных структурных особенностей выполняют преобразование Радона [11]. Существуют также методики, позволяющие проводить сравнение рельефов поверхностей: первоначальной и после химической или механической обработки [12].

По окончании подготовительных действий — после исключения выбросов и шумов из рассмотрения, можно переходить непосредственно к анализу объектов, расположенных на рельефе. И сразу же возникает проблема очерчивания границ объектов для их дальнейшего исследования. Эта процедура называется сегментацией [8–10, 13–14] и требует обычно использования пространственных фильтров повышения резкости.

Таким образом, на практике для выделения объектов на рельефе служит комплекс перечисленных фильтров и подходов, на основе которого и возможно создание новых методик. В качестве примера можно привести комплексный фильтр Лапласа–Гаусса [8, 15], суть которого заключается в последовательном применении двух фильтров. На первом шаге сглаживаются опытные данные о поверхности фильтром Гаусса. На втором шаге работает фильтр, ядром которого является лапласиан. Результат работы последнего — определение областей резких перепадов высот или быстрого изменения интенсивности, благодаря чему можно легко выделить границы объектов. Так как фильтр с ядром в виде лапласиана чувствителен к наличию шумов, то процедуру необходимо производить именно в указанной последовательности.

Интерес представляет также следующий алгоритм выделения объектов на неровной поверхности [16]. Сначала исходное изображение разбивают на некоторое количество непересекающихся квадратов. Размер квадратов выбирают в зависимости от масштаба неровностей. В каждой такой области находят абсолютное значение минимума. В результате получается новая матрица, состоящая из минимальных значений. Далее она интерполируется до размера исходного изображения и вычитается из исходной матрицы данных. Благодаря этому удается исключить крупномасштабные неровности. Данный алгоритм работает только в случае, когда типичный размер выделяемых частиц значительно меньше характерных неровностей поверхности. Недостатком применения данного метода, по аналогии с пространственными фильтрами повышения резкости, является увеличение, по сравнению с исходным изображением, количества шумов в конечном изображении. То есть перед началом проведения данной процедуры необходимо исключить шумы, если они присутствуют в матрице, отвечающей исходному состоянию [17].

Для оценки размеров включений в образце, в котором исключены крупные неровности, применяют также методику разделения исходного изображения поверхности на две фазы. Первую фазу, соответствующую более глубоким участкам поверхности, показывают одним цветом, вторую фазу — фазу высоких участков, — другим цветом. Выбирают некий уровень, относительно которого все более низкие области считают первой фазой, а все области выше его — второй фазой, содержащей исследуемые объекты. Далее с помощью методов статистического анализа определяют средний размер частиц, их расположение и форму [18]. Однако такой пороговый метод приводит к тому, что некоторые частицы, лежащие в «низинах» не учитываются, а частицы, расположенные на «холмах», вносят дополнительные погрешности.

В данной работе показан простой и надежный метод выделения объектов заданного размера на криволинейной поверхности. В основе метода лежит разделение исходного рельефа на несколько рельефов с помощью линейных пространственных фильтров. Эффективность предложенного метода показана на модельной поверхности. Методика может использоваться при изучении нанокompозитов с наполнителями зернистого типа.

2. Многоуровневый метод анализа рельефа

Любой рельеф поверхности можно разложить на несколько рельефов. Такую процедуру называют декомпозицией топографической поверхности и применяют при создании географических карт [19]. Представим исследуемый рельеф в виде суммы трех рельефов: $A(x, y)$ — рельеф, содержащий объекты с высокой кривизной поверхности, $B(x, y)$ — рельеф с объектами промежуточной кривизны поверхности, $C(x, y)$ — рельеф с объектами малой кривизны. Введенные таким образом рельефы поверхности будем называть далее, соответственно, рельефами с малыми, средними и большими объектами. Схематично такое разделение показано на рисунке 1.

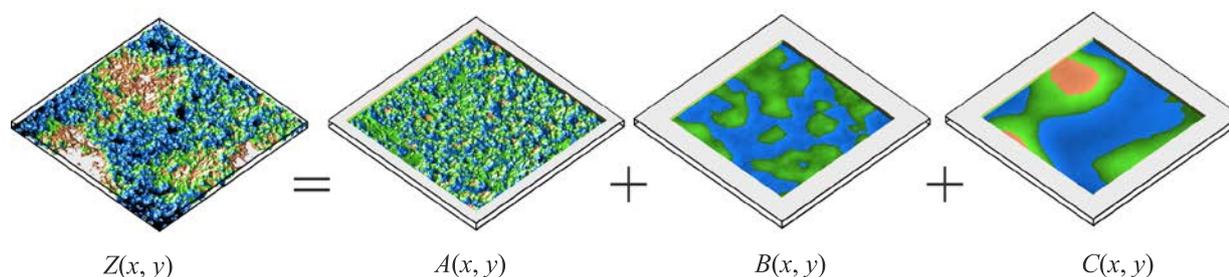


Рис. 1. Представление исходного изображения в виде суммы трех изображений

Рельеф, содержащий объекты высокой кривизны поверхности (рельеф с малыми объектами), является результатом вычитания из исходного рельефа $Z(x, y)$ рельефа $Z_1(x, y)$, который, в свою очередь, есть итог работы срединного фильтра по малой области S_1 . Это можно записать в виде следующей математической формулы:

$$A(x, y) = Z(x, y) - Z_1(x, y) = Z(x, y) - \frac{1}{S_1} \int_{S_1} \Phi_1(x - x_0, y - y_0) Z(x_0, y_0) dx_0 dy_0,$$

где $\Phi_1(x - x_0, y - y_0)$ — ядро интегрального оператора (Рис. 2а), удовлетворяющее условию нормирования:

$$\frac{1}{S_1} \int_{S_1} \Phi_1(x - x_0, y - y_0) dx_0 dy_0 = 1,$$

где x_0, y_0 — координаты рассматриваемой точки. В данной работе ядром служит прямоугольное окно (Рис. 2б).

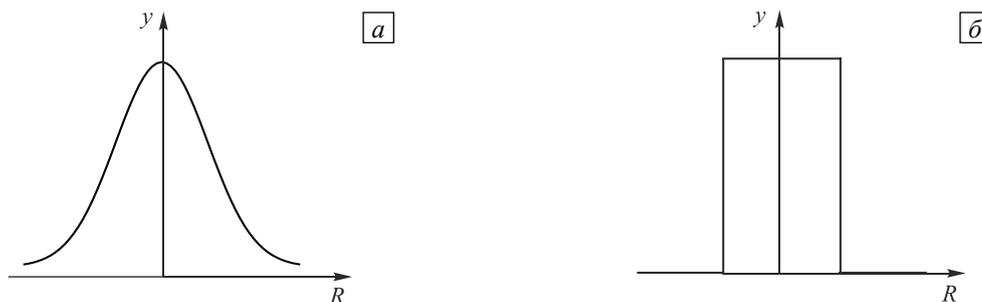


Рис. 2. Возможный вид ядра интегрального оператора (а) и прямоугольное окно осреднения (б), где $R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$

Рельефом с большими объектами будем называть рельеф, полученный с помощью сглаживающего линейного фильтра, как осреднение в окрестности рассматриваемой точки по большой области S_2 . Формула для его нахождения будет следующей:

$$C(x, y) = Z_2(x, y) = \frac{1}{S_2} \int_{S_2} \Phi_2(x - x_0, y - y_0) Z(x_0, y_0) dx_0 dy_0,$$

где $\Phi_2(x - x_0, y - y_0)$ — ядро интегрального оператора (Рис. 2а), для которого имеет место условие нормирования:

$$\frac{1}{S_2} \int_{S_2} \Phi_2(x - x_0, y - y_0) dx_0 dy_0 = 1.$$

Рельефом с объектами промежуточной кривизны будем называть рельеф, который является разностью осредненных по малой — S_1 , и большой — S_2 , областям рельефа:

$$B(x, y) = Z_1(x, y) - Z_2(x, y) = \frac{1}{S_1} \int_{S_1} \Phi_1(x - x_0, y - y_0) Z(x_0, y_0) dx_0 dy_0 - \frac{1}{S_2} \int_{S_2} \Phi_2(x - x_0, y - y_0) Z(x_0, y_0) dx_0 dy_0. \quad (1)$$

То есть рельеф $B(x, y)$ будет содержать объекты средних размеров, которые не вошли в рельефы $A(x, y)$ и $C(x, y)$. Нетрудно убедиться, что формула (1) предназначенная для получения рельефа со средними объектами, является вейвлетом Хаара [8].

Очевидно, что благодаря такому методу разложения исходного рельефа, выравнивание рельефов с объектами высокой и промежуточной кривизны происходит автоматически за счет осреднения. Следовательно, сглаживание исходной поверхности требуется только для рельефа с большими объектами. Размеры объектов, которые необходимо выделить на поверхности материала, определяются размерами областей S_1 и S_2 , которые используются для осреднения

3. Приложение метода и достоверность результатов

Для апробации предложенного метода рассмотрим некоторую модельную поверхность. Построим ее с помощью компьютера таким образом, чтобы она была близка к реальным поверхностям материала, исследуемым с помощью АСМ. Создадим поверхность размерами 12800 на 12800 нм. На рельефе с малыми объектами случайным образом расположим объекты шарообразной формы радиусом 100 нм. Все агрегаты имеют разную высоту над поверхностью, но не превышающую 25 нм (Рис. 3а). Такое значение высоты выбрано на основе экспериментальных данных, полученных методами АСМ для нанокompозитов.

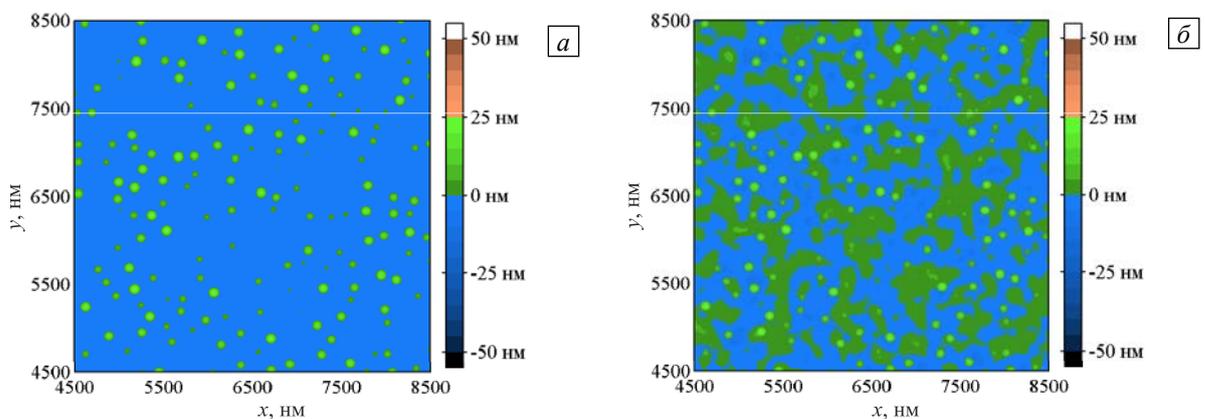


Рис. 3. Рельеф, содержащий объекты с высокой кривизной поверхности: исходное изображение (а) и изображение, полученное с помощью метода многоуровневой визуализации (б)

Рельеф со средними объектами зададим таким образом, чтобы он включал в себя объекты с кривизной поверхности разных порядков (Рис. 4а). Добавим также линейный наклон поверхности, который неизбежен при проведении экспериментов, так как на практике установить образец таким образом, чтобы он был расположен параллельно движению кантилевера, невозможно. Построенная с помощью компьютерной программы поверхность, которая является суммой перечисленных рельефов и линейного наклона, представлена на рисунке 5а. Из-за линейного наклона не возможен зрительный анализ, поэтому на рисунке 5б показан этот же рельеф, но уже после его выравнивания с помощью вычитания наклонной плоскости из исследуемой поверхности. При этом прием вычитания наклонной плоскости отражается только на рельефе поверхности малой кривизны $C(x, y)$.

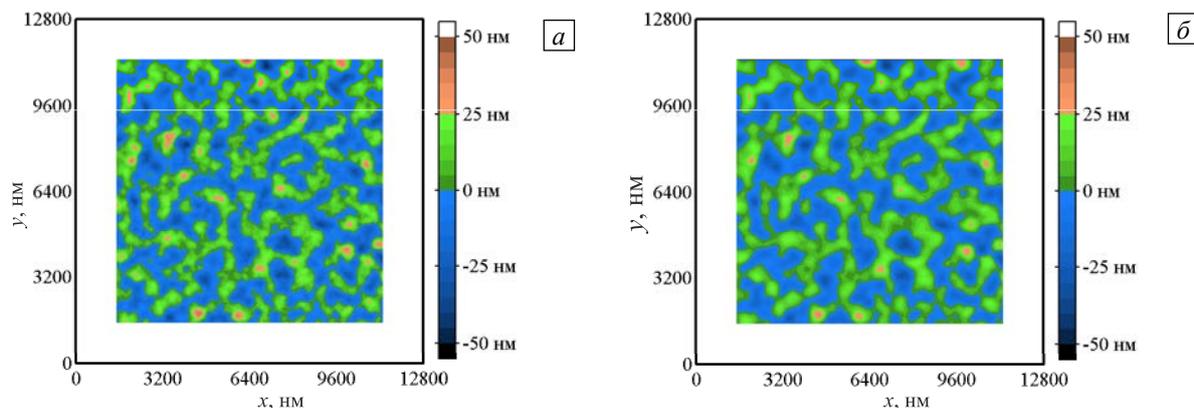


Рис. 4. Рельеф, содержащий объекты с промежуточной кривизной поверхности: исходное изображение (а) и изображение, полученное с помощью метода многоуровневой визуализации (б)

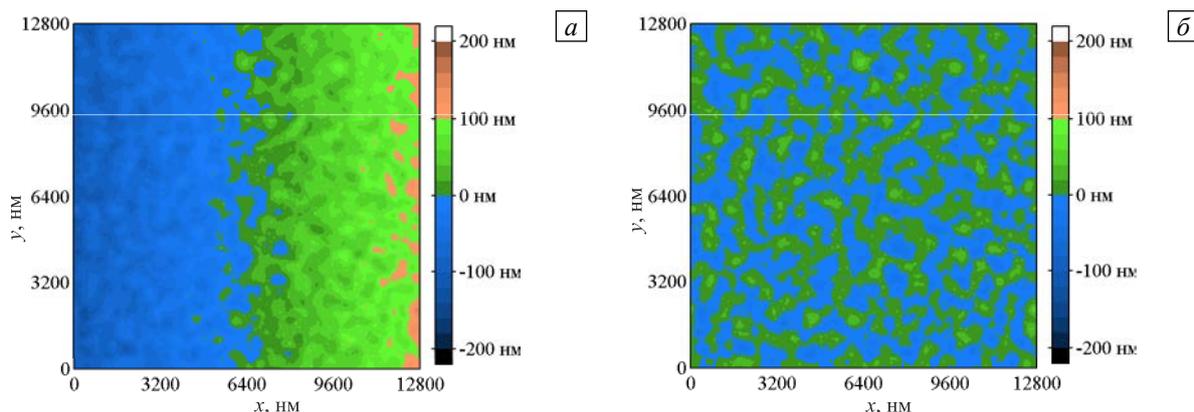


Рис. 5. Вид моделируемой поверхности: исходный (а) и после выравнивания (б)

При компьютерном картографировании широко используется аналитическая отмывка при боковом освещении [20]. Изображение моделируемой поверхности с применением данного метода показано на рисунке 6. В результате получается изображение поверхности с освещенными участками рельефа и тенями от выступающих объектов, как это обычно видят человеческие глаза.

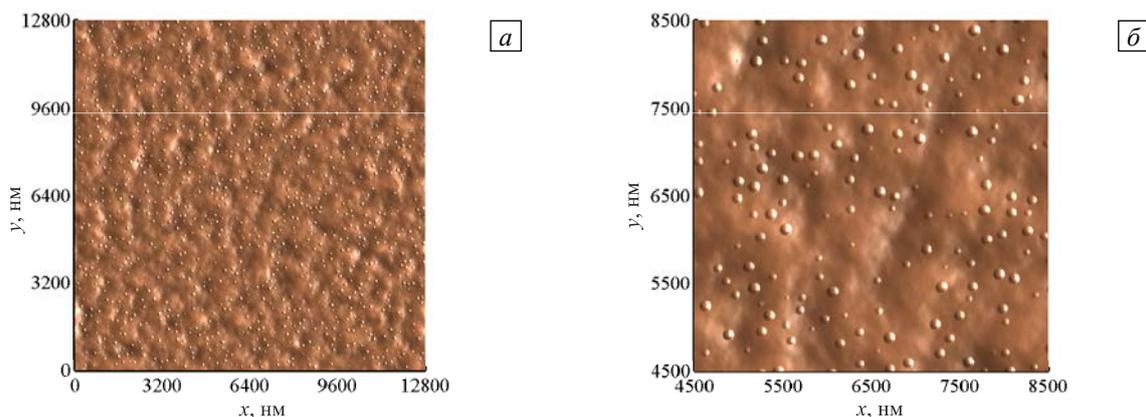


Рис. 6. Моделируемая поверхность (а) и ее увеличенная в четыре раза центральная часть (б)

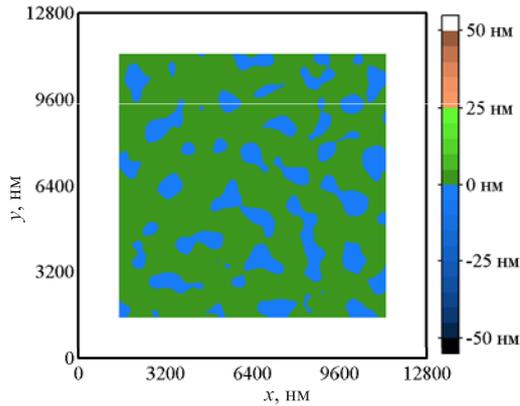


Рис. 7. Рельеф малой кривизны, полученный с помощью многоуровневого анализа

оператора рассмотрим окно, показанное на рисунке 2б. Выполнив процедуру многоуровневого анализа, найдем три рельефа: с малыми (Рис. 3б), средними (Рис. 4б) и большими (Рис. 7) объектами.

Обратим внимание на размеры полученных рельефов. Начальное изображение составляет 12800 на 12800 нм (Рис. 5), рельеф с малыми объектами — 12500 на 12500 нм (Рис. 9), а рельефы со средними и большими объектами — 9800 на 9800 нм (Рис. 4б и 7). Такие размеры изображений объясняются тем, что при построении рельефа, содержащего объекты высокой кривизны поверхности, было использовано осреднение по кругу радиусом 150 нм, а для рельефов с объектами малой и промежуточной кривизны поверхности — по кругу радиусом 1500 нм. Таким образом, на границе исходного изображения информация теряется, что приводит к сужению области исследования. Заметим, что рельеф малой кривизны (Рис. 7), обычно интереса не представляет.

Выделенный рельеф с объектами средних размеров хорошо согласуется по виду с исходным рельефом (Рис. 6) с той лишь разницей, что наблюдается некоторая размытость объектов, но область нерезкого изображения не превышает по высоте 5 нм. Учет такой поверхности необходим, когда изучаются особенности ветвления трещины, распространяющейся перед кончиком ножа ультрамикротомом при изготовлении образцов. Важным промежуточный уровень является и при анализе структуры материала с объектами двух характерных размеров, существенно отличающихся друг от друга. Можно привести и другие примеры.

В данной работе интерес сосредоточим именно на рельефе с малыми объектами, так как метод разрабатывался для целей выявления расположения частиц наполнителя в эластомере. Благодаря предложенному методу действительно удалось выделить объекты заданного характерного размера радиусом 100 нм (Рис. 3б). Однако найденный рельеф содержит не только искомые объекты, но и некоторые области высотой, не превышающей 5 нм. Может показаться, что это есть погрешность выделения объектов с высокой кривизной поверхности. Но проведенное дополнительное исследование позволило заключить, что наличие или отсутствие этих областей зависит от рельефа, содержащего объекты промежуточной кривизны. Нетрудно проверить, что если в качестве исходной поверхности выбрать рельеф с малыми объектами (см. Рис. 3а), то в результате многоуровневого анализа получается изображение, показанное на рисунке 8б.

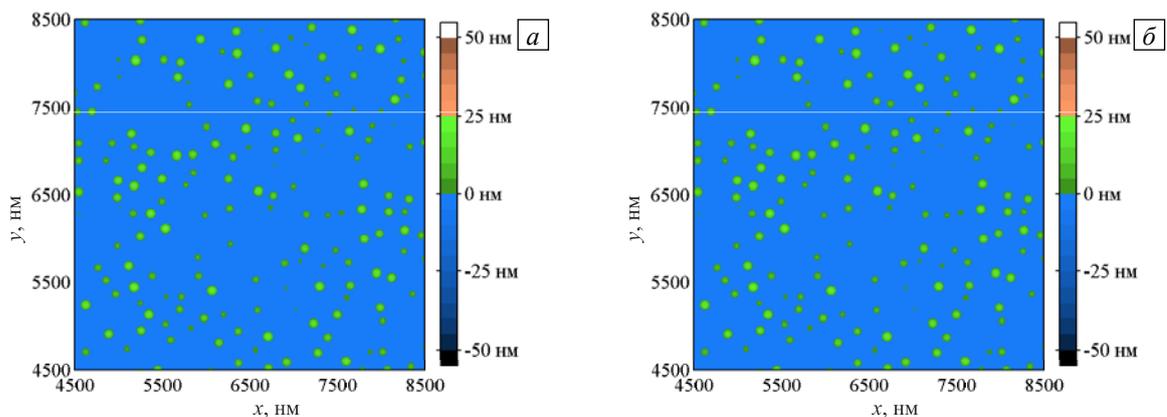


Рис. 8. Рельеф, содержащий объекты с высокой кривизной поверхности: исходное изображение (а) и изображение, полученное с помощью метода многоуровневой визуализации (б)

Проверим эффективность метода многоуровневой визуализации на примере построенной модельной поверхности. Здесь точно известно, какие именно малые и средние объекты должны быть обнаружены предлагаемым методом.

Для того чтобы начать исследование, необходимо определить области осреднения. Пусть область S_1 — круг радиусом r , S_2 — круг радиусом R . Возьмем r большим, чем размер объектов, которые необходимо выделить на рельефе с малыми объектами. Так как радиус созданных объектов составляет 100 нм, то пусть $r = 150$ нм и допустим, что еще интерес представляют объекты или неровности поверхности, размер которых в 10 раз больше, то есть $R = 1500$ нм. В качестве ядра интегрального

Таким образом, объекты заданного характерного размера выделить удалось. Однако для определения их расположения или размеров необходимо исключить из рассмотрения области, которые отражают особенности рельефа промежуточного уровня. С этой целью предлагается применить к исходному и найденному с помощью многоуровневой визуализации рельефам с малыми объектами (Рис. 3) идеальный фильтр низких частот [8]. Суть этого заключается в следующем. Введем новую функцию γ :

$$\gamma(x, y) = \begin{cases} 1, & A(x, y) > h, \\ 0, & A(x, y) \leq h. \end{cases}$$

Здесь h — некоторое заданное значение. В результате работы такого фильтра при значении высоты $h = 0$ нм поверхность рельефа ($\gamma(x, y) \cdot A(x, y)$) будет иметь вид, показанный на рисунке 9 как для исходного изображения, так и для полученного с помощью многоуровневого анализа. На этом рисунке черный цвет соответствует значениям высот, большим заданного значения h , белый цвет — меньшим.

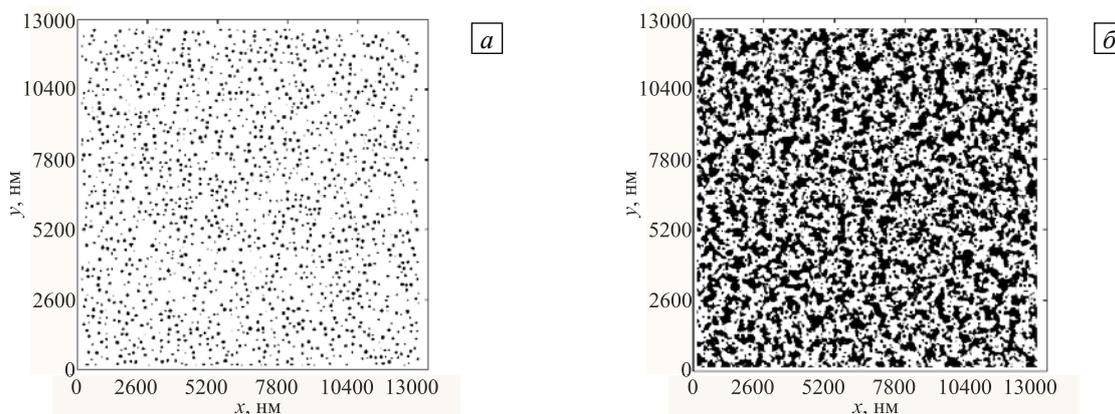


Рис. 9. Выделенные объекты с высокой кривизной поверхности на исходном изображении (а) и после выполнения процедуры многоуровневой визуализации (б)

Определим такое значение параметра h , при котором найденный рельеф, содержащий объекты высокой кривизны поверхности (Рис. 9б), будет максимально соответствовать исходному рельефу (Рис. 9а). Для выбора критерия поступим следующим образом. Найдем долю черных точек на исходном модельном изображении. Обозначим эту величину через ϕ . Введенный параметр ϕ отвечает значению 0,07. Построим зависимость доли черных точек от высоты h для рельефа с малыми объектами, установленного в результате многоуровневого анализа (Рис. 10а). Из графика видно, что при значении параметра h , равном 4 нм, найденный рельеф должен наилучшим образом совпадать с исходным рельефом. Если брать большее значение высоты, то теряется информация о некоторых объектах, если брать меньшее h , то начинает сказываться погрешность промежуточного уровня. При таком значении высоты выделенные объекты показаны на рисунке 10б. Далее уже можно применять статистические методы обработки данных для полученного изображения.

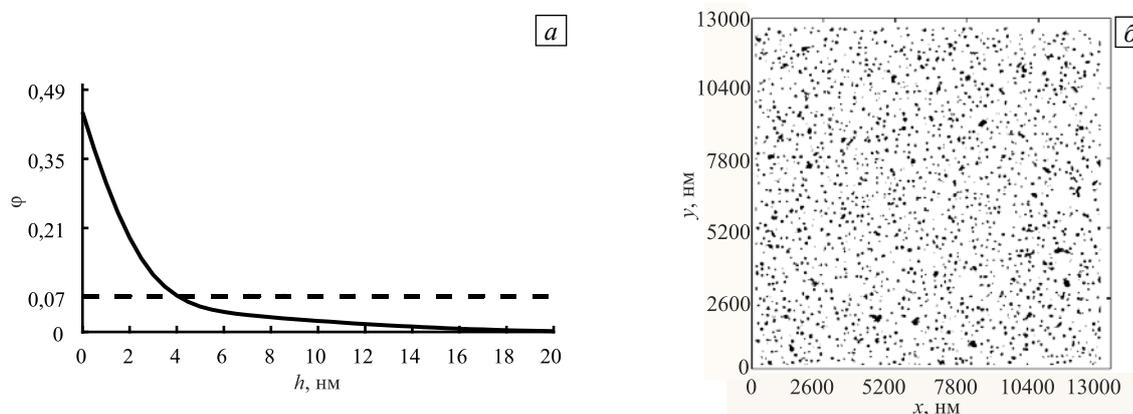


Рис. 10. Доля выделенных черных областей на рельефе, содержащем объекты с высокой кривизной поверхности (а); рельеф с малыми объектами, полученный предложенным методом, при $h = 4$ нм (б)

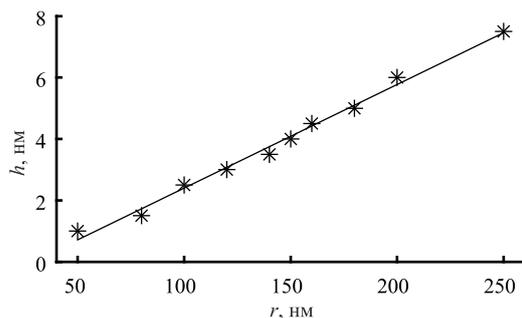


Рис. 11. Зависимость параметра h от окна осреднения при анализе рельефов с малыми объектами

рельефом (Рис. 3а). В результате была построена зависимость, показанная на рисунке 11, которая может быть аппроксимирована выражением: $h = 0,03r - 0,97$. Таким образом, задавая окно осреднения и используя полученное выражение, можно выделять интересные частицы и разбирать особенности их расположения.

4. Выводы

Предложен метод многоуровневой визуализации, предназначенный для анализа структуры поверхности нанокомпозитов с наполнителем зернистого типа. Метод позволяет разделить рассматриваемый рельеф поверхности на три составляющих: рельеф, содержащий объекты с высокой кривизной поверхности, рельеф малой кривизны и рельеф с объектами промежуточной кривизны поверхности. Каждый из рельефов включает в себе объекты заданного характерного размера и рассматривается независимо от других.

Апробация представленного метода на модельной поверхности, геометрия которой заранее известна, показала, что такой подход дает возможность эффективно находить выступающие на поверхности объекты заданного размера.

Установлена зависимость между радиусом осреднения, используемым для получения рельефа с объектами высокой кривизны поверхности, и значением высоты. На основе этой зависимости удается наилучшим образом определять геометрию выделяемых объектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16-08-00914-р_а, 14-01-96002-р_урал_а).

Литература

1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – Н.-Новгород: Институт физики микроструктур РАН, 2004. – 115 с.
2. Гаршин О.К. Моделирование контактного режима работы атомно-силового микроскопа с учетом немеханических сил взаимодействия с поверхностью образца // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2012. – Т. 5, № 1. – С. 61-69. DOI
3. Butt H.-J., Cappella B., Kappl M. Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications // Surf. Sci. Rep. – 2005. – Vol. 59, no. 1-6. – P. 1-152. DOI
4. Wang C.C., Wu S.H., Donnet J.B., Wang T.K. Microdispersion of carbon blacks in rubber: Distance distribution of aggregates by AFM image analysis Part II. // Kaut. Gummi Kunstst. – 2006. – Vol. 59, no. 9. – P. 466-472.
5. <http://www.ntmdt.ru/mikroskopy-dlya-obrazovaniya/nanoeducator-2> (дата обращения: 04.07.2016).
6. <http://gwyddion.net/documentation/user-guide-ru/filters.html> (дата обращения: 04.07.2016).
7. <http://www.nanoscopy.net/femtoscanonline/ru/> (дата обращения: 04.07.2016).
8. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital image processing. – New Jersey: Prentice Hall, 2002. – 793 p.
9. Стругайло В.В. Обзор методов фильтрации и сегментации цифровых изображений // Наука и образование. – 2012. – Т. 5. – С. 270-281. DOI
10. Краснящих А.В. Обработка оптических изображений. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 130 с.
11. Серебряков А.Е. Анализ трехмерных изображений нанорельефа оптических поверхностей / Дисс... канд. техн. наук: 01.04.01. – Рязань, РГРТУ, 2015. – 155 с.
12. Iziumov R.I., Svistkov A.L. Cartographic method of surface characteristics analysis // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2016. – Vol. 26, no. 1. – P. 125-135. DOI
13. Wang Y., Wang H., Bi S., Guo B. Automatic morphological characterization of nanobubbles with a novel image segmentation method and its application in the study of nanobubble coalescence // Beilstein J. Nanotechnol. – 2015. – Vol. 6. – P. 952-963. DOI
14. Morozov I.A. Identification of primary and secondary filler structures in a polymer matrix by atomic force microscopy images analysis methods // Polym. Composite. – 2013. – Vol. 34, no. 3. – P. 433-442. DOI
15. Севрюк В.А., Брунков П.Н., Шальнев И.В., Гуткин А.А., Климко Г.В., Гронин С.В., Сорокин С.В., Конников С.Г.

- Статистический анализ топографических АСМ-изображений самоорганизованных квантовых точек // ФТП. – 2013. – Т. 47, № 7. – С. 921-926. (English version [DOI](#)).
16. Чуکلанов А.П., Бородин П.А., Зиганшина С.А., Бухараев А.А. Алгоритм для анализа АСМ-изображений поверхностей со сложной морфологией // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2008. – Т. 150, № 2. – С. 220-227.
 17. Фурман Я.А., Кравецкий А.В., Передрев А.К., Роженцов А.А., Хафизов Р.Г., Егосина И.Л., Леухин А.Н. Введение в контурный анализ: приложение к обработке изображений и сигналов. – М: Физматлит, 2003. – 592 с.
 18. Меншиков Е.А., Большакова А.В., Виноградова О.И., Яминский И.В. Методы анализа АСМ-изображений тонких пленок блок-сополимеров // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2009. – Т. 45, № 1. – С. 108-111. (English version [DOI](#)).
 19. Флоринский И.В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа / Дисс... д-ра техн. наук: 25.00.33. – Пушкино, МИИГАиК, 2010. – 267 с.
 20. Ковалева О.В. Совершенствование изображения рельефа на мелкомасштабных картах / Дисс... канд. техн. наук: 25.00.33. – Москва, МИИГАиК, 2012. – 218 с.

References

1. Mironov V.L. *Fundamentals of scanning probe microscopy*. Nizhny Novgorod: Institute of Physics of Microstructures RAS, 2004. 97 p.
2. Garishin O.K. Simulation of atomic-force microscope contact mode operation taking into account nonmechanical forces of interaction with a specimen surface. *Vychisl. mekh. splosh. sred – Computational Continuum Mechanics*, 2012, vol. 5, no.1, pp. 61-69. [DOI](#)
3. Butt H.-J., Cappella B., Kappl M. Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications. *Surf. Sci. Rep.*, 2005, vol. 59, no. 1-6, pp. 1-152. [DOI](#)
4. Wang C.C., Wu S.H., Donnet J.B., Wang T.K. Microdispersion of carbon blacks in rubber: Distance distribution of aggregates by AFM image analysis Part II. *Kaut. Gummi Kunstst.*, 2006, vol. 59, no. 9, pp. 466-472.
5. <http://www.ntmdt.ru/mikroskopy-dlya-obrazovaniya/nanoeducator-2> (accessed 04 July 2016).
6. <http://gwyddion.net/documentation/user-guide-ru/filters.html> (accessed 04 July 2016).
7. <http://www.nanoscopy.net/femtoscanonline/ru/> (accessed 04 July 2016).
8. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital image processing*. New Jersey, Prentice Hall, 2002. 793 p.
9. Strugailo V.V. Review of filtration and segmentation methods for digital images. *Science & Education*, 2012, vol. 5, pp. 270-281. [DOI](#)
10. Krasnyashchikh A.V. *Obrabotka opticheskikh izobrazhenij* [Processing of optical images]. St. Petersburg: ITMO University, 2012. 130 p.
11. Serebryakov A.E. *Analiz trekhmernykh izobrazhenij nanorel'efa opticheskikh poverkhnostej* [Analysis of three-dimensional images of a nanorelief of optical surfaces]. PhD Dissertation, Ryazan State Radioengineering University, Ryazan, 2015. 155 p.
12. Iziumov R.I., Svistkov A.L. Cartographic method of surface characteristics analysis. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2016, vol. 26, no. 1, pp. 125-135. [DOI](#)
13. Wang Y., Wang H., Bi S., Guo B. Automatic morphological characterization of nanobubbles with a novel image segmentation method and its application in the study of nanobubble coalescence *Beilstein J. Nanotechnol*, 2015, vol. 6, pp. 952-963. [DOI](#)
14. Morozov I.A. Identification of primary and secondary filler structures in a polymer matrix by atomic force microscopy images analysis methods *Polym. Composite*, 2013, vol. 34, no.3, pp. 433-442. [DOI](#)
15. Sevriuk V.A., Brunkov P.N., Shalnev I.V., Gutkin A.A., Klimko G.V., Gronin S.V., Sorokin S.V., Konnikov S.G. Statistical analysis of AFM topography images of self-assembled quantum dots. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, no. 7, pp. 930-934. [DOI](#)
16. Chuklanov A.P., Borodin P.A., Ziganshina S.A., Bukharaev A.A. Algoritm dlya analiza ASM-izobrazhenij poverkhnostej so slozhnoj morfologiej [Algorithm for analyzing AFM images with complex morphology]. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki – Proceedings of Kazan University. Series: Physics and Mathematics Sciences*, 2008, vol. 150, no. 2, pp. 220-227.
17. Furman Ya.A., Kravetskiy A.V., Peredrev A.K., Rozhentsov A.A., Khafizov R.G., Egoshina I.L., Leukhin A.N. *Vvedenie v konturny analiz: prilozhenie k obrabotke izobrazhenij i signalov* [Introduction to the contour analysis: application to image and signal processing]. Moscow: Fizmatlit, 2003. 592 p.
18. Men'shikov E.A., Bol'shakova A.V., Vinogradova O.I., Yaminsky I.V. Methods for analysis of the AFM images of thin films of block copolymers. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2009, vol. 45, no.1, pp. 105-108. [DOI](#)
19. Florinskiy I.V. *Teoriya i prilozheniya matematiko-kartograficheskogo modelirovaniya rel'efa* [Theory and applications of mathematical and cartographic modeling of relief]. Doctoral Dissertation, Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Pushchino, 2010. 267 p.
20. Kovaleva O.V. *Sovershenstvovanie izobrazheniya rel'efa na melkomasshtabnykh kartakh* [Refinement of relief images using small-scale maps] PhD Dissertation, Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, 2012. 218 p.

Поступила в редакцию 26.04.2016; опубликована в электронном виде 30.09.2016

Сведения об авторах

Ужегова Надежда Ивановна, инж.-исслед., Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, Пермь, ул. Академика Королева, д. 1; e-mail: uzhegova@icmm.ru

Свистков Александр Львович, дфмн, зав. лаб, ИМСС УрО РАН; e-mail: svistkov@icmm.ru