

На правах рукописи

Леесмент Станислав Игоревич

**МЕТОДЫ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ КОРРЕКЦИИ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ
В АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

С.-Петербург – 2012

Работа выполнена в ЗАО «НТ-МДТ»

Научный руководитель: доктор технических наук,
Быков Виктор Александрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Мионов Виктор Леонидович
кандидат физико-математических наук,
Горбенко Ольга Марковна

Ведущая организация: Министерство промышленности и
торговли Российской Федерации.
Федеральное агентство по техническому
регулированию и метрологии. Открытое
акционерное общество «Научно-
исследовательский центр по изучению
свойств поверхности и вакуума»

Защита состоится 14 мая 2012 г. в 15-00 на заседании
диссертационного совета Д 002.034.01 при Федеральном
государственном бюджетном учреждении науки Институте
аналитического приборостроения РАН (ИАП РАН) по адресу: 198095,
г. Санкт-Петербург ул. Ивана Черных д. 31-33

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАП РАН по
адресу: 190103, Санкт-Петербург, Рижский пр., 26

Автореферат разослан «07» апреля 2012 г.

Щербаков А.П.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Разработка новых материалов с применением нанотехнологий неразрывно связана с развитием приборно-технологической базы в этой области, что предъявляет основное требование к используемому экспериментальному оборудованию: оно должно позволять получать достоверные количественные характеристики наноструктур и нанообъектов.

Атомно-силовая микроскопия (АСМ), являющаяся доминирующим направлением в сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) позволяет исследовать поверхности материалов с высоким пространственным разрешением, являясь, таким образом, одним из основных инструментов в современной нанотехнологии. Данный вид микроскопии позволяет получать качественную и количественную информацию о свойствах как наноструктур, так и отдельных нанообъектов. В то же время, постоянно растущий объем исследований в области нанотехнологий требует развития методов количественного анализа экспериментальных данных, а также автоматизации их обработки. Формализация процедур обработки данных СЗМ позволяет радикально повысить эффективность исследований, однако отсутствие экспертного контроля на каждом из этапов может привести к понижению достоверности результатов анализа. Связано это в большой степени с наличием различного рода искажений в экспериментальных данных. Разработка новых методов анализа и обработки АСМ данных, позволяет повысить достоверность и полноту результатов качественного и количественного анализа.

Цель и задачи работы

Целью диссертационной работы является разработка новых методов для усовершенствования программно-аппаратного обеспечения исследований структурных особенностей объектов на наноразмерном уровне методом АСМ.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. разработка метода устранения аппаратных искажений при получении изображения поверхности;
2. разработка формализованных методов предварительной обработки АСМ данных для повышения качества их последующей экспертизы;
3. применение методов фрактальной геометрии к анализу морфологических свойств и управлению качеством АСМ данных;

4. разработка и применение усовершенствованных методик программно-аппаратного обеспечения для исследования характеристик наноструктурных материалов (порошки, компакты, керамики, биологические ткани).

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые:

1. Предложен оригинальный метод измерения рельефа поверхности на основе самосогласованной калибровки ошибки обратной связи;
2. Разработан и экспериментально опробован самосогласованный фильтр высоких частот (СРФ) для увеличения контрастности границ исследуемых объектов;
3. Разработан формализованный метод устранения межстрочных скачков, минимизирующий погрешности последующего анализа широкого класса АСМ изображений;
4. Предложен подход к анализу морфологических свойств и управлению качеством СЗМ данных с использованием методов фрактальной геометрии;
5. На основе разработанного метода впервые предложен способ определения степени зрелости коллагеновых волокон методом АСМ.

Научно-практическая значимость работы

Предложенные методы расширяют возможности и повышают достоверность количественного анализа АСМ изображений нанообъектов. Они могут быть использованы при автоматизированной потоковой обработке больших объемов экспериментальных данных в ходе разработки новых наноструктурных материалов.

Достоверность полученных результатов подтверждается воспроизводимостью результатов экспериментов, проведенных в одних и тех же условиях, проведением модельных экспериментов по верификации предложенных методов, сопоставлением и соответствием результатам других авторов.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод получения изображения рельефа поверхности позволяет устранять аппаратные искажения АСМ-данных и усовершенствовать способ ускорения измерения рельефа поверхности сканирующим зондовым микроскопом
2. Самосогласованный ранговый фильтр (СРФ) позволяет увеличивать контрастность границ объектов на АСМ изображениях и достоверность процесса сегментации изображений
3. Метод устранения межстрочных скачков позволяет формализованно исключать характерную фоновую составляющую из анализируемых АСМ изображений
4. Предложенный подход на основе фрактальной геометрии расширяет возможности количественного анализа и позволяет управлять качеством АСМ-данных;
5. Способ определения степени зрелости коллагеновых волокон позволяет выявлять новообразованные ткани.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, совещаниях и семинарах: 2-я Международная конференция/молодежная школа-семинар «Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства», г. Владимир, 2009; VIII, IX Всероссийская конференция «Физико-химия ультрадисперсных систем», г. Белгород, 2008, г. Ижевск, 2011; Международный симпозиум «Нанопизика и наноэлектроника – 2011», г. Нижний Новгород, 2011, 2012; XII, XIII, XIV Российская конференция по электронной микроскопии, г. Черноголовка, 2008, 2009, 2010; Второй международный форум по нанотехнологиям Rusnanotech-2009, г. Москва, 2009; 1-я ежегодная конференция Нанотехнологического общества России, г. Москва, 2009.

Исследования по тематике диссертационной работы выполнялись в рамках частно-государственного партнерства по Постановлению Правительства РФ от 09.04.2010 №218 согласно Договору 13.G25.31.0052

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 11 печатных работ, в том числе 6 статей в изданиях из перечня ВАК и 3 патента Российской Федерации, а также подана одна заявка на патент.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем работы составляет 101 страница, работа содержит 37 рисунков, 1 таблицу, список цитируемых источников из 113 наименований.

Личный вклад автора состоит в разработке оригинальных подходов, лежащих в основе представленных методов, верификации алгоритмов и постановке заданий на их внедрение. Получение экспериментальных АСМ-результатов для биологических тканей

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи работы, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту. Излагается краткое содержание работы по главам.

В первой главе проведен обзор по методам математической обработки данных АСМ-исследований, предложена классификация причин и проявлений искажений на АСМ изображениях, описаны традиционные методы борьбы с искажениями, сформулированы задачи исследования.

Во второй главе на основе самосогласованного алгоритма разработан метод устранения искажений рельефа, вызванных ошибкой обратной связи, в методе постоянной силы.

Несовершенство юстировки параметров цепи обратной связи (ОС) приводит к ряду аппаратных искажений АСМ-данных [1], особенно при увеличении скоростей сканирования. В то же время, сигнал рассогласования системы ОС (сигнал ошибки ОС), возникающий в процессе сканирования, может быть использован для восстановления информации о рельефе на АСМ изображениях.

Для восстановления информации о рельефе поверхности [2] используется соотношение:

$$R = R_M + K_C \cdot E, \quad (1)$$

где R – рельеф без учета ошибки ОС, R_M – измеренный рельеф, E – значение ошибки ОС в текущей координате K_C – коэффициент пересчета.

Метод самосогласованной калибровки ошибки обратной связи заключается в следующем: во время измерения рельефа поверхности регистрируются сигналы вертикальных перемещений сканера (рельеф поверхности) и взаимодействия зонда с образцом (сигнал ошибки ОС) в прямом и обратном направлениях. Затем, производится вычитание соответствующих «разнонаправленных» профилей соответствующих сигналов. Таким образом, для каждой строки изображений имеется профиль ошибки в единицах измерения рельефа и единицах измерения сигнала взаимодействия зонда с объектом. Поскольку в рамках рассматриваемой модели причина возникновения этих ошибок имеет схожий характер, можно предположить, что искомый коэффициент пересчета K_C должен удовлетворять минимуму среднеквадратической разности двух этих профилей:

$$RMS[(R_{MForward} - R_{MBackward}) - K_C \cdot (E_{Forward} - E_{Backward})] \rightarrow 0, \quad (2)$$

где $R_{MForward}$ – рельеф, измеренный на прямом проходе, $R_{MBackward}$ – рельеф, измеренный на обратном проходе, $E_{Forward}$ – ошибка ОС на прямом проходе, $E_{Backward}$ – ошибка ОС, измеренная на обратном проходе. Получены результаты восстановления рельефа поверхности для калибровочных решеток, которые находятся в хорошем соответствии с известными параметрами образцов (Рис. 1,2).

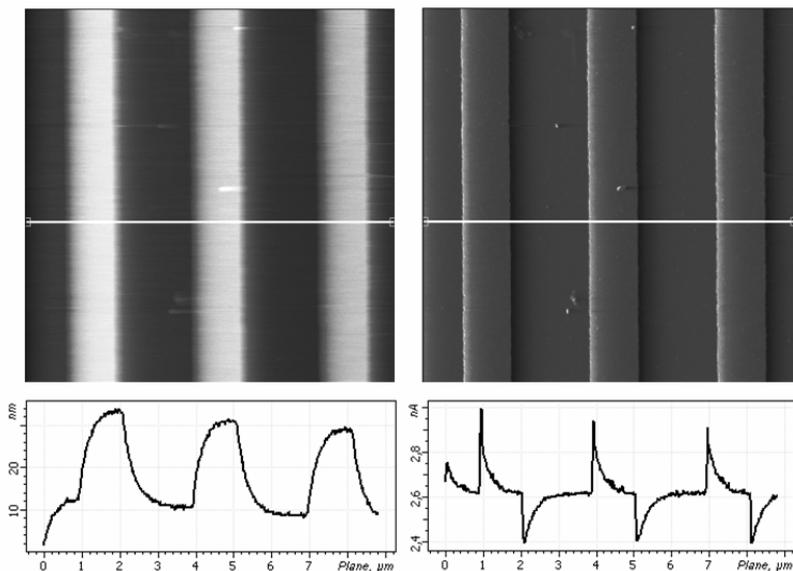


Рис. 1. Изображения калибровочной решетки и профилей сечений до обработки. Слева – измеренный рельеф. Справа – ошибка обратной связи. Скорость сканирования 15 Гц. Размер скана 9×9 мкм. Направление сканирования: слева направо.

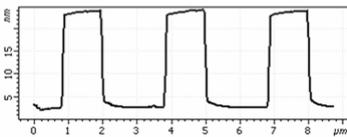
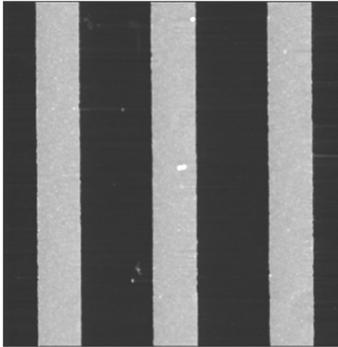


Рис. 2. Результат работы метода: восстановленный рельеф и усредненный профиль

Помимо обработки полученных данных, предложенный метод был использован в способе ускорения измерения рельефа поверхности для АСМ, в качестве источника рельефа предыдущей строки, избавленного от вышеописанного аппаратного искажения.

Применение метода может быть распространено на другие методики АСМ: амплитудной модуляции, туннельную и пр.

В третьей главе представлены результаты разработки методов предварительной обработки АСМ изображений, основанные на самосогласованных алгоритмах и позволяющие увеличивать контрастность границ исследуемых объектов и устранять межстрочные скачки.

С целью уменьшения эффекта размытия объектов и увеличения контрастности границ предложен самосогласованный ранговый фильтр высоких частот (СРФ), осуществляющий следующее преобразование исходного изображения:

$$F_K(x, y) = F_0(x, y) + LE_{LX,LY}(F_0(x, y)) \cdot K, \quad (3)$$

где: $F_K(x, y)$ – результирующая матрица; $F_0(x, y)$ – матрица исходного изображения; $LE_{LX,LY}(F_0(x, y))$ – процедура локальной эквализации исходного изображения с окном $\{LX, LY\}$, определяемым корреляционными длинами в соответствующих направлениях; K – коэффициент компенсации размытия. Процедура локальной эквализации является методом повышения локальных контрастов и призвана усилить различия в значениях яркости соседних элементов [3], что чрезвычайно важно для последующей задачи сегментации.

Для применения данного СРФ фильтра в качестве окна эквализации используется скользящее окно с размерами, характерными для среднестатистического объекта исходного изображения. Выбор размера окна осуществлялся с использованием пространственной автокорреляционной функции, вычисляемой на окне заданного размера и при фиксированном сдвиге. Известно, что при фиксированном сдвиге области крупноразмерных объектов размерам среднестатистических объектов будет соответствовать более высокое значение автокорреляционной функции [3]. Таким образом, размер объектов изображения пропорционален ширине автокорреляционной функции, что позволяет задавать характерные линейные размеры LX и LY для данного изображения.

Для подбора коэффициента K используется метод апостериорной оценки, основанный на поиске минимума функции G_{34} , являющейся разностью модулей нормированных центральных моментов 3 и 4 порядка фильтрованного изображения при различных значениях K :

$$G_{34}(x, y) = \mu_3 C_3 - \mu_4 C_4, \quad (4)$$

где μ_3, μ_4 – соответствующие центральные статистические моменты фильтрованного изображения, пропорциональные статистическим асимметрии и эксцессу; C_3, C_4 – коэффициенты, нормирующие эти функции к единичному размаху в диапазоне рассматриваемых K .

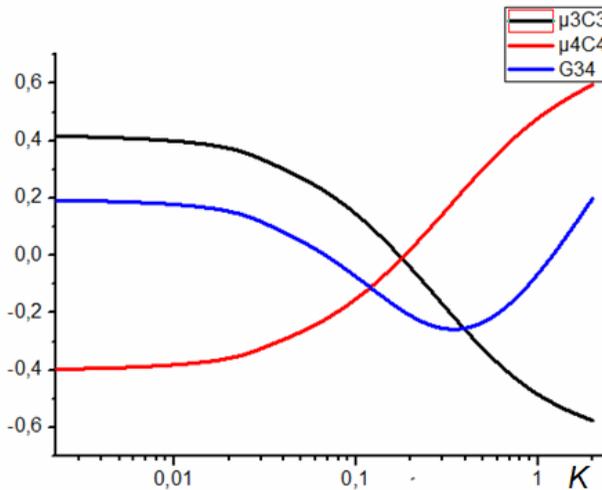


Рис. 3. Пример функции G_{34} (синяя линия), построенной на фоне $\mu_3 C_3$ (черная линия) и $\mu_4 C_4$ (красная линия)

Тестирование метода проводилось на модельных АСМ изображениях, представляющих собой набор шаров, расположенных вблизи некоторой «опорной» поверхности [4]. Размытие границ объектов производилось с применением фильтра Гаусса.

Применение алгоритма сегментации [5] с целью автоматического подсчета количества объектов на скане показало, что использование СРФ для увеличения контрастности изображения позволяет повысить достоверность сегментации изображения.

Качественное и количественное исследование морфологии конструкционной наноструктурной керамики имеет важное практическое значение при отработке технологии производства новых перспективных материалов. Результат применения СРФ к АСМ-изображению скола компактированного нанопорошка диоксида циркония с последующей сегментацией зерен представлен на Рис. 4.

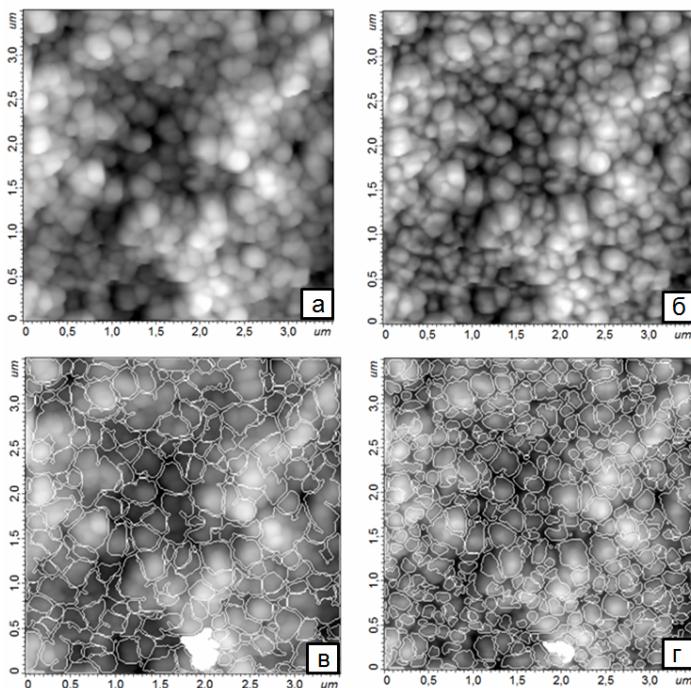


Рис. 4. Применение СРФ метода к АСМ-изображению скола компактированного нанопорошка. а) исходные данные, б) изображение, обработанное СРФ-методом, в,г) соответствующие результаты сегментации

Как видно из рисунка, применение СРФ-метода скомпенсировало размытие границ зерен. При сегментации изображения количество выделенных объектов возросло с 267 (Рис. 4 в) до 538 (Рис. 4 г).

При анализе процессов регенерации протекающих в зоне травмы в биологических тканях важным показателем является степень зрелости коллагеновых волокон. Оценка степени зрелости коллагеновых волокон производится из анализа поперечной исчерченности волокон (D-исчерченности). Применение СРФ-метода позволяет дифференцировать разницу в высоте шага (D-исчерченность) и увеличить точность диагностики.

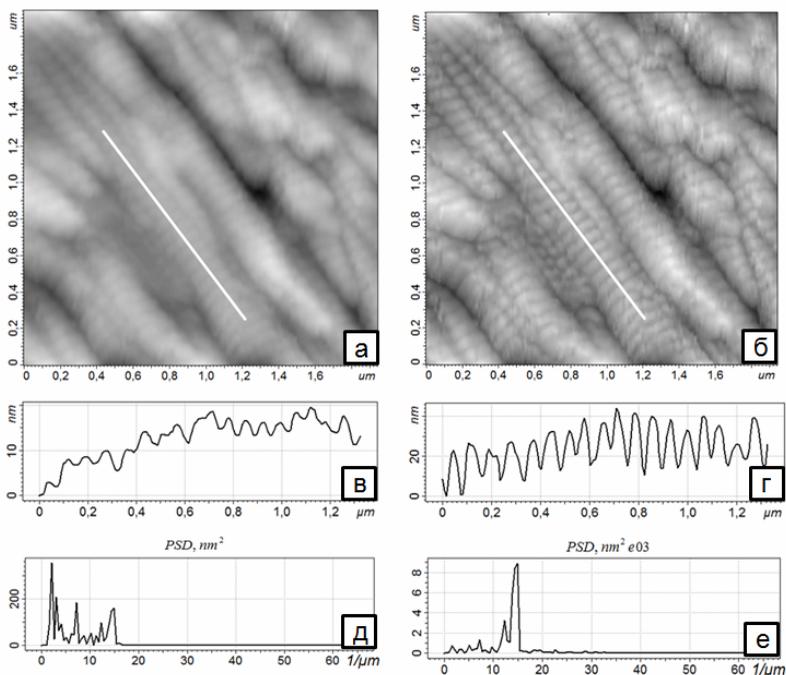


Рис. 5 Изображения участка склеры с новообразованными коллагеновыми волокнами в зоне имплантации действующего препарата. АСМ изображения а – до применения метода СРФ, б – после. в,г – соответствующие профили сечения, д,е – плотность спектральной функции профилей

На Рис. 5 а,б представлены АСМ-изображения участка склеры глаза кролика с новообразованными коллагеновыми волокнами в зоне имплантации действующего препарата до и после использования метода СРФ, соответственно. Ниже приведены соответствующие профили сечений (рис.5 в,г) и плотности спектральных функций этих профилей (Рис. 5 д,е), вычисленные при помощи быстрого преобразования Фурье с предварительным вычитанием полинома второго порядка. Хорошо видно, что профиль, измеренный на изображении, обработанном СРФ, дает четкий максимум в частотном пространстве, соответствующий периоду ~ 69 нм исследуемой структуры, в то время как спектральная функция профиля, соответствующего необработанному изображению, имеет многомодальный спектр без выраженных максимумов.

Для устранения межстрочных скачков широкого класса изображений в работе предложен метод построчного вычитания полиномиального фона на основе гистограммы АСМ изображения. Выбор диапазона высот на гистограмме формализован на основе апостериорной оценки, рассчитываемой из среднеквадратического отклонения между двумя изображениями, обработанных при соседних значениях положений границ диапазона выделения. Метод использован в методике создания панорамных изображений для проведения предварительной фильтрации фрагментов с целью устранения искажений на границах. На рис.6 представлено исходное модельное изображение (Рис.6 а), результат панорамирования без предварительной обработки фрагментов (Рис. 6 б), с применением обычного алгоритма построчного вычитания аппроксимирующих полиномов (Рис. 6 в) и с использованием фрагментов, обработанных предложенным методом (Рис. 6 г).

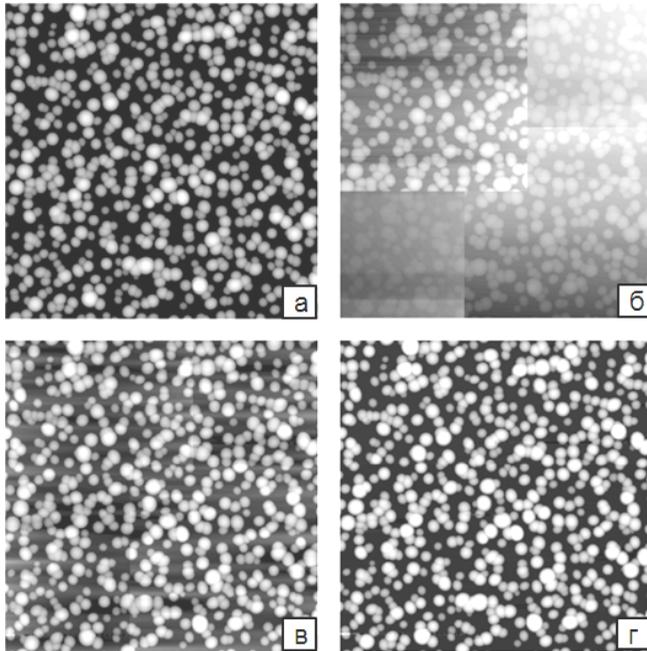


Рис. 6 Панорамирование модельного изображения. а – исходное модельное изображение; панорамирование: б – без применения метода, в – с применением обычного алгоритма построчного вычитания аппроксимирующих полиномов, г – с применением метода

Оценка точности метода проводилась путем сравнения среднеквадратического отклонения результата от эталона. Значения ошибки оказались равны 22% - без применения обработки; 5.2% - с применением стандартного вычитания и 1.3% - с применением предложенного метода.

В четвертой главе рассматривается подход к анализу морфологических свойств и управлению качеством АСМ данных с использованием методов фрактальной геометрии [6].

Для определения избыточности и достаточности измерений (размер матрицы данных) АСМ изображений исследовались профили сечений методами фрактальной геометрии. При анализе зависимости длины фрактального множества от точности аппроксимации выявлено, что при выходе зависимости в насыщение добавление в выборку дополнительных элементов перестает повышать ее информативность, что позволяет управлять качеством получаемых данных путем избавления от избыточности измерений.

Показатель Херста, $0 < H < 1$, связанный с фрактальной размерностью D соотношением

$$D = 2 - H, \quad (4)$$

определяет характер тенденции, присущий выборке. Чем больше значение показателя отличается от $1/2$, тем более предсказуемым становится распределение высот в исследуемой области. Данный факт открывает возможность использования показателя Херста для улучшения качества получаемых изображений [8]. Для этого использовался алгоритм случайных сложений Фосса [8, 9, 10], суть которого заключается в том, что, имея некоторую произвольную зависимость, можно построить случайный рельеф, используя следующий рекурсивный алгоритм: между исходными точками последовательности, путем случайного сложения добавляются новые точки последовательности; начальное значение точки соответствует среднеарифметическому значению двух соседних измерений. К этому значению случайным образом добавляют независимые приращения; при этом на каждом шаге генерации дисперсия ведет себя по следующему закону

$$\sigma^2(d_i) = r^{2H} \sigma^2(d_{i-1}), \quad (5)$$

где $\sigma^2(d_i)$ – дисперсия приращений для i -ого шага, r – коэффициент разбиения.

В этом случае показатель Херста выбирается произвольным образом как и шаг разбиения, но для рассматриваемого случая, показатель Херста известен, поэтому можно дополнить последовательность измерений, не изменяя корреляцию в распределении высот, сохраняя тем самым, статистические свойства обрабатываемых данных.

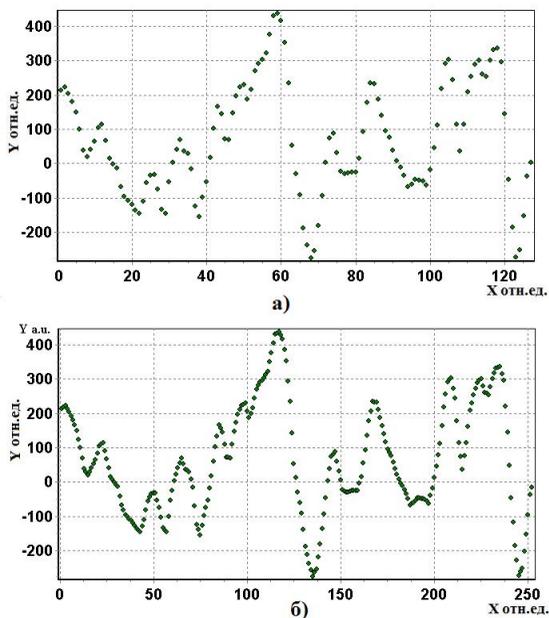


Рис. 6. Улучшение качества изображений: а) прореженная последовательность; б) восстановленная последовательность.

На Рис. 6, показан пример такого улучшения качества. Рис. 6 а представляет экспериментальную кривую, из которой последовательно удалена каждая вторая измеренная высота. После чего, определив начальную дисперсию и показатель Херста по алгоритму случайных сложений Фосса, проведено добавление новых точек. Результат восстановления представлен на Рис. 6 б. Для представленной зависимости относительная ошибка восстановления составила около 10%. Это связано с тем, что в выбранном примере имеются как мелкомасштабные так и крупномасштабные изменения. При восстановлении более «однородных» зависимостей достигалась ошибка не более 4%.

Следует заметить, что рассмотренные здесь подходы к обработке АСМ-данных методами фрактальной геометрии для одномерного случая применимы так же к двух- и трехмерным выборкам.

В заключении кратко сформулированы основные результаты, диссертационной работы.

Основные результаты и выводы

1. Предложенный метод измерения рельефа поверхности на основе самосогласованной калибровки ошибки обратной связи позволяет получать восстановленное изображение рельефа поверхности объекта. Метод был использован при разработке способа ускорения измерения рельефа поверхности для АСМ.
2. Разработан самосогласованный ранговый фильтр (СРФ), позволяющий повысить контрастность границ объектов. Использование СРФ на этапе предварительной фильтрации изображения увеличивает достоверность процесса сегментации изображения.
3. Предложен метод удаления межстрочных скачков для широкого класса изображений с использованием построчного вычитания полиномиального фона на основе гистограммы скана. Использование метода позволяет применять формализованный подход при обработке больших объемов данных.
4. Определение фрактальных свойств структуры позволяет управлять качеством получаемых изображений как за счет избавления от избыточности измерений, так и за счет улучшения детализации карты высот анализируемого рельефа.
5. На основе предложенного фильтра СРФ создан способ оценки степени зрелости коллагеновых волокон, позволяющий различать структуру коллагеновых волокон, имеющих различную степень зрелости, в одном образце. Предлагаемый способ наряду с упрощением, обеспечивает повышение достоверности результатов.

Цитированная литература

1. ASTM E2382 - 04 // Guide to Scanner and Tip Related Artifacts in Scanning Tunneling Microscopy and Atomic Force Microscopy. – 2004
2. Magonov, S.N. Surface Analysis with STM and AFM. Experimental and Theoretical Aspects of Image Analysis / S.N.Magonov, M.H. Whangbo . – VCH. - 1996.
3. Гонсалес, Р. / Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. Р.Гонсалес, Р. Вудс. - М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
4. Смурьгин, А.В. Геометрическое моделирование структуры нанометериалов для тестирования методов сегментации изображений сканирующей зондовой микроскопии / А.В.Смурьгин, Д.В.Хлопов, О.М.Немцова, О.В.Карбань, И.В.Журбин // Математическое моделирование. - 2011. - Т.23. - №12. - с. 143-150
5. Хлопов, Д. В. Метод выделения границ объектов на изображениях сканирующей зондовой микроскопии / Д. В. Хлопов, О. В. Карбань, М. В. Телегина, О. М. Немцова, И. В. Журбин, А. В. Смурьгин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2010. - № 2. - с.71-77
6. Федер Е. Фракталы. - М.: Мир, 1991. – 261
7. Zahn, W. The dependance of fractal dimension on measuring conditions of scanning probe microscopy /W. Zahn, A. Zösc // Fresenius J Analen Chem. - 1999. - V. 365. – P. 168-172
8. The Use of scanning probe microscopy for diagnostics of laser-induced surface instabilities / A.O. Kuhcerik [et al.] // Laser Physics.- 2005. - V. 15. - N. 7. - P.1–4.
9. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. - М.: Университетская книга, 2005. - 847 с.
10. Шитов, В.В. О модификации алгоритма Фосса при моделировании внутренней структуры пористой среды / В.В. Шитов, П.В. Москалев // ЖТФ. - 2005. - Т.75. - В 2. – С. 1-5

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях (* публикации из списка ВАКа):

- 1*. Карбань, О.В. Применение современных методов исследования для изучения оксидных нанокерамик / О.В.Карбань, О.М.Канунникова, Е.И.Саламатов, Е.Н.Хазанов, С.И.Леесмент, О.Ю.Гончаров // Химическая физика и мезоскопия. - 2009. - Т.11. - № 4. - С.499-511
- 2*. Жаров, В.В. Сканирующая зондовая микроскопия в изучении регенерации тканей при склеропластических операциях в офтальмологии / В.В. Жаров, А.Н. Лялин, О.В. Карбань, П.А. Перевозчиков, Н.Н. Самарцева, Г.Н. Коныгин, С.И.Леесмент // Поверхность. Рентгеновские, синхотронные и нейтронные исследования. - 2009. - №10.- С.69-74
- 3*. Маловичко, И.М. Применение фазокомпенсирующего метода обратной динамики для увеличения скорости сканирования зондового микроскопа /И.М. Маловичко, А.Ю. Остащенко, С.И. Леесмент// Известия РАН. Серия Физическая. - 2011- Т. 75 - № 1, С. 14-17
- 4*. Хлопов, Д.В. Анализ и фильтрация изображений сканирующей зондовой микроскопии /Д.В.Хлопов, С.И.Леесмент, О.В.Карбань, О.М.Немцова, И.В.Журбин// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2011. - №6. - С.36-43
- 5*. Аракелян, С.М. Использование методов фрактальной геометрии для анализа морфологических свойств и управления качеством получаемого информационного массива по результатам измерений наноразмерных объектов с использованием атомно-силового микроскопа / Аракелян С.М., Быков В.А., Кутровская С.В., Кучерик А.О., Леесмент С.И., Троицкий Д.П., Прокошев В.Г. //Нано- и микросистемная техника. - 2011. - № 4.- С.8-13
- 6*. Карбань, О.В. Сканирующая зондовая микроскопия как метод определения свойств механоактивированных биологических материалов и реакции на них тканевых структур глаза /О.В. Карбань, Ю.Г. Васильев,В.В. Жаров,П.А. Перевозчиков, С.И. Леесмент, С.В. Тимофеев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – Т. 117. - № 4 - С.199-206
- 7*. Быков, А.В. Способ измерения рельефа поверхности объекта с использованием сканирующего зондового микроскопа / Быков А.В., Быков В.А., Леесмент С.И., Рябоконт В.Н. // патент на изобретение № 2329465 – 2008 г.
8. Быков, В.А. Способ ускорения измерения рельефа поверхности для сканирующего зондового микроскопа / Быков В.А., Быков А.В., Котов

В.В., Маловичко И.М., Остащенко А.Ю., Леесмент С.И. // Патент на изобретение №248655. – 2011

9. Жаров, В.В. Способ определения степени зрелости коллагеновых волокон / В.В. Жаров, П.А. Перевозчиков, О.В. Карбань, Ю.Г. Васильев, С.И. Леесмент / Заявка на изобретение № 2009118749/15 (025771) от 18.05.2009 – положительное решение о выдаче патента РФ от 20.10.2011 г.
10. Догадин, С.Е. Способ автоматизированного создания панорамных СЗМ изображений / С.Е.Догадин, С.И.Леесмент, О.В. Карбань // Труды XV международного симпозиума ”Нанозфизика и нанофотоника – 2011”, 14-18 марта 2011, Нижний Новгород. Т.2. С. 558-559

Подписано в печать
Тираж 79 экз.
Отпечатано в ЗАО «НТ-МДТ»