

Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского

Национальный исследовательский университет

Учебно-научный и инновационный комплекс
"Новые многофункциональные материалы и нанотехнологии"

Круглов А.В.

**ОБРАБОТКА, ЧИСЛЕННАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ
СЗМ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ
РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

/На основе программного пакета SPMLab/

(Учебное пособие)

Мероприятие 2.2. Развитие сетевой интеграции с ведущими университетами страны, научно-исследовательскими институтами Российской академии наук, предприятиями-партнерами, создание новых форм взаимодействия

Учебные дисциплины: «Сканирующая зондовая микроскопия»

Специальности, направления: «Физика», «Нанотехнология», «Нанотехнология в электронике», «Микроэлектроника и полупроводниковые приборы», «Электроника и наноэлектроника»

УДК 53.086, 538.9

ББК 22.3с

К-84

К-84 Круглов А.В.. **Обработка, численная характеристика СЗМ изображений и представление результатов эксперимента. /На основе программного пакета SPMLab/:** Учебное пособие. – Нижний Новгород: Издательство Нижегородского госуниверситета, 2010. – 50 с.

В лаборатории сканирующей зондовой микроскопии Научно-образовательного центра Физики твердотельных наноструктур ННГУ имеются зондовые микроскопы разных марок как российских, так и иностранных компаний-производителей. Каждый микроскоп управляется оригинальной программой управления. Однако обработка СЗМ изображений в некоторых из них вызывает определенные трудности. Наиболее функциональной и удобной для обработки, численной характеристики СЗМ изображений и наглядного представления результатов эксперимента является программа SPMLab производства компании TopoMetrix. Данное пособие представляет собой иллюстрированный конкретными примерами перевод на русский язык руководства пользователя программы SPMLab. В пособии описаны основные способы обработки изображений, проведения количественных измерений и представления результатов эксперимента с помощью этой оболочки.

Предназначена для студентов, обучающихся по специальности 210601 - нанотехнология в электронике, бакалавров и магистров, обучающихся по направлению подготовки 210600 - нанотехнология, аспирантам, слушающим курсы по сканирующей зондовой микроскопии и проводящим самостоятельные исследования.

УДК 53.086, 538.9

ББК 22.3с

© Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, 2010

Введение

Метод сканирующей зондовой микроскопии, подобно механическому профилометру, основан на использовании механического зонда для получения увеличенного изображения поверхности. В современных зондовых микроскопах изображения получают в виде массива цифровых данных $z(x,y)$.

Необходимость обработки исходных изображений связана как с возникающими при получении изображения артефактами, вызванными неидеальной работой пьезокерамики или конечной формой зонда, так и с неизбежными факторами, такими, как наклон образца относительно x - y плоскости движения сканера и т.п. Кроме того, применение отдельных видов обработки позволяет нагляднее продемонстрировать те или иные поверхностные особенности. При этом надо помнить, что неумелое использование программных средств наряду с устранением недостатков, может приводить к возникновению дополнительных артефактов на изображении. Поэтому обязательно знание алгоритмов, используемых при обработке СЗМ изображений.

Уникальностью метода сканирующей зондовой микроскопии является многообразие количественных данных, которые могут быть получены из каждого СЗМ изображения. При этом используются программные инструменты измерений линейных размеров, параметров шероховатости и других характеристик поверхности. Важно знать все возможности программы SPMLab и уметь грамотно их использовать для получения необходимых данных.

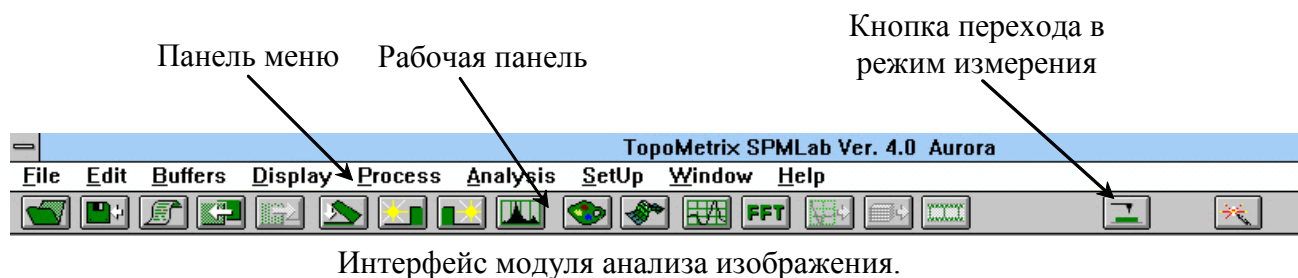
Не менее важным условием завершения работы является представление результатов эксперимента в удобном для пользователя виде. Это требует наиболее наглядного представления полученного изображения с точки зрения интересующих поверхностных особенностей.

Программа SPMLab - модульная система, предназначенная для измерения (модуль Data Acquisition), редактирования и анализа изображений (модуль Image Analysis), и экранного редактора (модуль Screen Editor) для сохранения результатов в доступных графических форматах. Обработка в программе SPMLab возможна как СЗМ изображений полученных в самой программе в режиме измерений, так и полученных в других программах и переконвертированных в совместимый формат. Программа-конвертор написан доцентом каф. ФПО Физического факультета ННГУ Шиляевым П.А.

Программное обеспечение к SPMLab написано на языке Си и работает во всех операционных системах Windows.

МОДУЛЬ РЕДАКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ (IMAGE ANALYSIS)

Модуль редактирования и анализа изображений (Image Analysis) работает с файлами tfr-формата и используется для обработки и численной характеристики СЗМ изображений. Интерфейс модуля показан на рисунке.



В меню отображения (Display) контролируются такие параметры, как контраст и яркость изображения, 3D построение, редактирование палитры, имитирование боковой подсветки и др. Визуализация изображения осуществляется без изменения исходных данных. В меню обработки (Process) к изображению могут быть применены следующие операции: левелинг, конволюция, фильтрация, вычитание фона, изменение размера, поворот изображения и др. В меню анализа (Analysis) изображение анализируется при помощи различных статистических и измерительных процедур, таких, как профиль линии, анализ пиков и долин, анализ частиц и зерен, определение шероховатости и т.д. Кнопки некоторых основных часто используемых процедур вынесены в рабочую панель, располагающуюся под панелью меню сверху экрана (см. рисунок).


В данном разделе пособия вначале будет приведено краткое описание всех пунктов меню модуля анализа изображения, а затем будет дано подробное описание функций и алгоритмов, использующихся в наиболее часто применяемых операциях обработки и анализа СЗМ изображений.


КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ИНТЕРФЕЙСА МОДУЛЯ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

File Menu (Меню: файл).

File	
File Manager...	Ctrl+O
Save as...	Ctrl+S
Export...	Ctrl+E
Import...	
Exit	Ctrl+X

Файл => Диспетчер файлов... (File Manager...) Вызывает окно диспетчера файлов, в котором отображаются все файлы, имеющие формат .tfr. Стандартный диспетчер файлов

позволяет такие операции как удаление, копирование, просмотр изображений и т.д. Эта функция также становится доступной при нажатии кнопки  в рабочей панели.

Файл => Сохранить как... (Save As...) Вызывает окно сохранения данных, позволяющее сохранить текущее выбранное изображение в формате .tfr. Эта функция также становится доступной при нажатии кнопки  в рабочей панели.

Файл => Экспорт... (Export...) Вызывает окно экспортирования для сохранения выбранных данных в формате ASCII (.txt) для использования их в других приложениях. Эта функция доступна не для всех данных.

Файл => Импорт... (Import...) Вызывает окно импортирования для считывания данных в форматах управляющих программ других типов микроскопов (.rsh, .rsd, .rsc и др.) для использования их в SPMLab. Эта функция доступна не для всех данных.

Файл => Выход (Exit) После предложения сохранить все несохраненные данные осуществляется выход из программы SPMLab.

Edit Menu (Меню: редактирование).

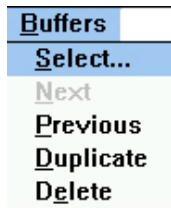




Редактирование => Экранный редактор (Screen Edit...) Вызывает модуль Экранного редактора, который позволяет сохранить изображение в графическом формате (.jpg, .bmp, .wmf, .tif, .gif и др.), используемым стандартными графическими программами. Он предназначен для передачи информации внешним пользователям, не имеющим программы SPMLab, а так же для визуального представления результатов эксперимента и распечатки их на принтере. Более подробно об этом будет написано ниже.

Редактирование => Редактирование данных (Data Edit...) Вызывает панель редактирования данных, позволяющую проводить четыре основных типа редактирования (вырезания): редактирование площади, удаление линии, удаление выброса, и приведение ступеньки к одной плоскости.

Редактирование => Нормализация по Z (Normalize Z...) Растягивает Z данные на изображении с максимально возможного диапазона точек (655530) до половины полного диапазона (655530/2). Если сглаживание уже проведено, все данные будут интерполированы между имеющимися точками данных.

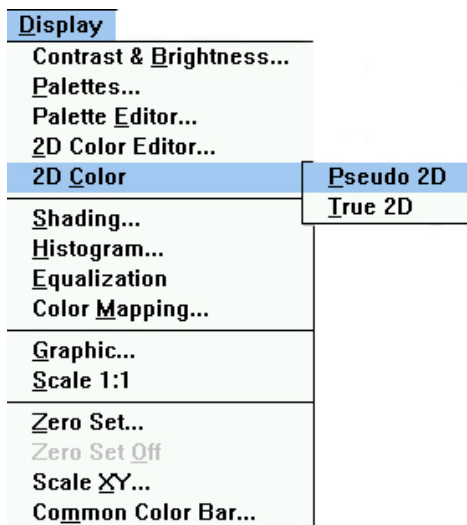
Buffers Menu (Меню: буфер).



В процессе обработки изображений в модуле анализа, каждая версия изображения записывается в массив буфера (максимум шесть изображений). Меню буфера предоставляет доступ ко всем изображениям в массиве: позволяет выбирать (Буфер => Выбор (Select...), Следующий (Next), Предыдущий (Previous)), копировать (Буфер => Копия (Duplicate)) и удалять (Буфер => Удалить (Delete)) изображения. Кнопки двух наиболее часто используемых функций – выбор следующего () и предыдущего () в последовательности изображения – вынесены на рабочую панель.

Display Menu (Меню: отображение).

Меню отображения предоставляет функции, позволяющие выбрать вид и форму представления изображения, т.е. его, цветовую палитру, трехмерное представление и пр.






Отображение => Контраст и яркость (Contrast & Brightness...) Вызывает панель редактирования контраста/яркости, позволяющую в реальном времени изменение от 0 до 100% контраста и яркости выбранного изображения.

Отображение => Палитры (Palettes...) Вызывает панель выбора цветовой палитры, которая каждой высоте на изображении ставит в соответствие определенный оттенок цвета.


Эта функция также становится доступной при нажатии кнопки  в рабочей панели.

Отображение => Редактор палитры (Palette Editor...) Вызывает панель редактирования цветовой палитры, которая в реальном времени позволяет редактирование цветовых значений выбранной палитры.

Отображение => Оттенение (Shading...) Вызывает панель управления подсветкой, с помощью которой можно оконтурить изображение при имитации источника света. Функция позволяет автоматическое размещение источника света слева и справа, или определяемый пользователем вектор расположения источника света. Автоматическая подсветка слева и справа доступна при нажатии кнопки  или  на рабочей панели, соответственно.

Отображение => Гистограмма (Histogram...) Вызывает панель гистограммы, которая представляет цветовое распределение высот на выбранном изображении. Она позволяет редактировать цветовую гистограмму, как всего изображения, так и части изображения. Эта функция также становится доступной при нажатии кнопки  на рабочей панели.

Отображение => Уравнивание (Equalization...) Представляет гистограмму высот так, что каждому оттенку цвета ставится в соответствие равное количество данных.

Отображение => Трехмерное построение (Graphic...) Вызывает панель трехмерного построения, которая позволяет представлять изображение в трехмерном виде под различными углами зрения. Эта функция также становится доступной при нажатии кнопки  на рабочей панели.

Отображение => Масштабирование 1:1 (Scale 1:1...) Возвращает размеры изображения (увеличивает или уменьшает) к масштабу 1:1 так, что одному пикселю на экране соответствует одна точка данных.

Отображение => Установка нуля (Zero Set...) Вызывает панель установки нуля, которая позволяет задать уровень нулевой высоты для изображения. Для отображения данных выше и ниже нулевого уровня можно использовать различные цветовые палитры.

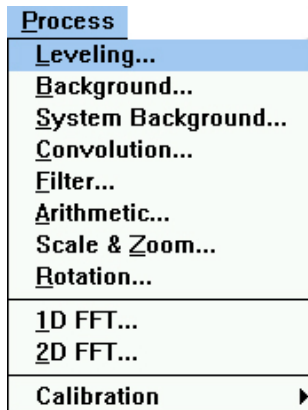
Отображение => XY масштабирование (Scale XY...) Вызывает панель масштабирования в горизонтальной плоскости, которая позволяет изменять масштаб изображения в плоскости XY и единицы измерения.


Замечание. При изменении размеров изображения и единиц измерения никакой математической конвертации не производится. Например, для изображения 12x12 мкм, изменение единиц на Å приведет к изображению, которое будет некорректно отображать размеры в XY плоскости как 12x12 Å. Эта функция используется для более удобного представления изображения, когда округление единиц производится незначительно, например с 11989x11989 нм на 12x12 мкм, без существенного искажения информации.

Отображение => Общая цветовая палитра (Common Color Bar...) Вызывает панель создания общей цветовой палитры, которая позволяет сравнивать до 6 подобных изображений, применяя одинаковый Z диапазон ко всем из них.

Process Menu (Меню: обработка).

Функции меню обработки относятся к категории действий, которые влияют на представление и интерпретацию данных. К ним относят устранение наклона, фильтрацию, вырезание части изображения и другие действия.



Обработка => Левелинг (Leveling...) Вызывает панель левелинга, которая содержит различные варианты автоматического или усовершенствованного левелинга, такие, как удаление изгиба и/или наклона из изображения. Удаление плоскости первого порядка (1st order 2D Leveling) может быть совершено автоматически при нажатии кнопки  на рабочей панели. Более подробное описание процедуры левелинга будет дано ниже.

Обработка => Устранение фона (Background...) Вызывает панель устранения фона, которая позволяет удалить фон под изображением. Эта процедура позволяет выделить малые детали на фоне больших плавных изменений на изображении путем устранения фона под изображением с размерами меньше заданного размера дуги или радиуса шарика. Более подробное описание процедуры устранения фона будет дано ниже.

Обработка => Конволюция (Convolution...) Вызывает панель конволюции, которая позволяет применить фильтрацию от точки к точке на изображении с помощью стандартной или созданной пользователем кернфункции (кернафункция – это матрица чисел, используемая для изменения точки в ее центре). Более подробное описание этой процедуры будет дано ниже.

Обработка => Фильтрация (Filter...) Вызывает панель фильтрации, которая позволяет применить фильтрацию Z данных на изображении. Функция фильтрации применяется для сглаживания низко-, средне- или высокочастотных деталей на основе выбранного пользователем размера матрицы. Более подробное описание этой процедуры будет дано ниже.


Обработка => Арифметика (Arithmetic...) Вызывает панель арифметики, которая позволяет складывать, вычитать, перемножать или делить два изображения, или процентное масштабирование первого изображения со вторым изображением.

Обработка => Масштабирование и зуммирование (Scale & Zoom...) Вызывает панель изменения масштаба и зуммирования. Эта функция позволяет выбирать различное разрешение

изображения, а так же выделять на исходном изображении отдельные области (зуммировать). Более подробное описание этой процедуры будет дано ниже.

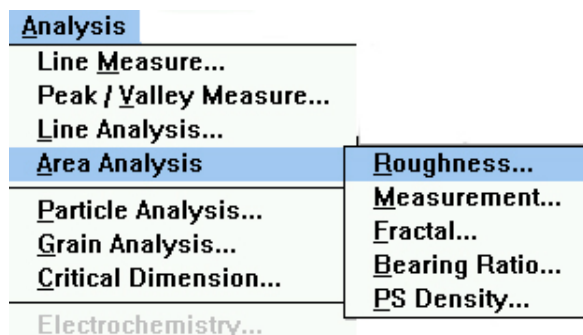
Обработка => Поворот (Rotation...) Вызывает панель управления поворотом, которая позволяет поворачивать изображение на фиксированный или заданный пользователем угол. Более подробное описание этой процедуры будет дано ниже.


Обработка => Одномерное преобразование Фурье (1D FFT...) Вызывает панель одномерного быстрого преобразования Фурье, которая отображает энергетический спектр выбранного изображения и позволяет его фильтровать отдельно в X, Y или X и Y направлениях. Более подробное описание этой процедуры будет дано ниже.

Обработка => Двумерное преобразование Фурье (2D FFT...) Вызывает панель двумерного быстрого преобразования Фурье, которая отображает энергетический спектр выбранного изображения в обоих направлениях и предлагает различные варианты его фильтрации. Эта функция также становится доступной при нажатии кнопки  в рабочей панели. Более подробное описание этой процедуры будет дано ниже.

Analysis Menu (Меню: анализ).

В этом режиме применяется ряд аналитических функций, позволяющих проводить точные количественные измерения на изображении.



Анализ => Измерение линии (Line Measure...) Вызывает панель профиля линии, которая позволяет выбирать и сравнивать три профиля линии (в горизонтальном, вертикальном или произвольном направлениях) на выбранном изображении. Функция позволяет отображать координаты XYZ выбранной точки, горизонтальное и вертикальное расстояние между выбранными на профиле линии точками, а так же угол с горизонтальной линией. Эта функция также становится доступной при нажатии кнопки  в рабочей панели. Более подробное описание этой процедуры будет дано ниже.

Анализ => Измерение пиков и впадин (Peak/Valley Measure...) Вызывает панель измерения пиков и впадин, которая позволяет анализировать изображение, создавая таблицу данных и строя гистограмму пространственного распределения между пиками и угловых

распределений между пиками и ближайшими впадинами. Более подробное описание этой процедуры будет дано ниже.

Анализ => Анализ линии (Line Analysis...) Вызывает панель анализа линии, которая позволяет проводить три различных типа анализа линии, такие как измерение высот (аналогично Line Measure), измерение шероховатости (стандартных параметров шероховатости вдоль линии), измерение покрытия (длины линии над заданным уровнем), фрактальные измерения. Более подробное описание этой процедуры будет дано ниже.

Анализ => Анализ площади (Area Analysis...) Позволяет проводить следующие виды анализа площади:

Шероховатость (Roughness...) Вызывает панель анализа стандартных параметров шероховатости, которая вычисляет и отображает параметры шероховатости для всей площади скана или для выбранного пользователем участка поверхности.

Измерение (Measurement...) Вызывает панель измерения площади, которая вычисляет площадь проекции и площадь поверхности для всего скана или для выбранного пользователем участка изображения.

Фрактал (Fractal...) Вызывает панель двумерного фрактального анализа, которая, используя алгоритм «измерения береговой линии», вычисляет фрактальную размерность поверхности. При этом вычисляется число островков (углублений) на изображении (основанное на выданных пользователем параметрах) и выполняется фрактальный анализ изображения.

Покрытие (Bearing Ratio...) Вызывает панель анализа двумерного покрытия, которая строит кривую покрытия для выбранного изображения. Покрытие (процентное значение площади поверхности над заданным пользователем уровнем) может быть вычислено для любой выбранной пользователем точки на кривой.

Плотность спектра (PS Density) Вызывает панель анализа плотности спектра, которая создает спектр выбранного изображения. Функция плотности спектра (PSD) определяется как квадрат модуля преобразования Фурье поверхности. Измерения среднеквадратичного отклонения (RMS) могут быть выполнены для любой определенной пользователем пары точек на кривой.

Анализ => Анализ частиц (Particle Analysis...) Вызывает панель анализа частиц, которая позволяет производить анализ частиц на поверхности (количество частиц, объем, занимаемый частицами, гистограмма объема, площадь, занимаемая частицами, периметр, средняя высота, максимальная высота), основанный на определенных пользователем минимальных учитываемых размерах частиц и диапазоне высот Z.

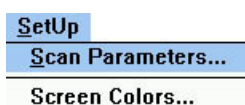
Анализ => Анализ зерен (Grain Analysis...) Вызывает панель анализа зерен (гранул), которая позволяет производить анализ зерен (количество зерен, объем, занимаемый зернами,


гистограмма объема, площадь, занимаемая зернами, периметр, средняя высота, максимальная высота), основанный на определенных пользователем минимальных учитываемых размерах зерен (по наклону или диапазону высот Z).

Анализ => Критические размеры (Critical Dimension...) Вызывает панель анализа критических размеров, которая предоставляет четыре основные геометрические модели, с помощью которых можно определять и анализировать критические размеры (ширина, высота ступеньки, угол, радиус и т.д.) некоторой выделенной площади на выбранном изображении.

SetUp Menu (Меню: настройка).

Меню настройки обеспечивает доступ к конфигурации управляющей программы микроскопа и графическому интерфейсу пользователя.




Настройка => Параметры скана (Scan Parameters...) Открывает окно Инфо-файла, который содержит основные существенные данные о режиме получения выбранного изображения (версию программы SPMLab, тип установки, тип зонда, скорость сканирования, направление сканирования и др.). Эта функция также становится доступной при нажатии кнопки  в рабочей панели.


Настройка => Экранные цвета (Screen Colors...) Вызывает панель настройки цветов, которая позволяет проводить различные цветовые настройки для экрана, изображения и диаграмм.

Window Menu (Меню: окно).

Обеспечивает доступ к модулю Измерений (Image Acquire) и позволяет управлять всеми окнами, открытыми в текущем модуле.



Окно => Получение изображения (Image Acquire) Переключает в модуль Получения данных. Все настройки и функции в модуле Анализа изображения остаются неизменными при нахождении в модуле получения данных. Эта функция также становится доступной при нажатии кнопки  в рабочей панели.

Находясь в модуле Получения изображения, выбор команды Window => Image Acquire или нажатие кнопки  переключает обратно в модуль Анализа изображения.

Окно => Следующий (Next) Выбирает (делает активным) «следующее» в последовательности открытых в модуле Анализа окно изображения.

Выбор любого из открытых в модуль Анализа изображения осуществляется щелчком левой кнопкой мыши на этом окне.

Окно => Предыдущий (Previous) Выбирает (делает активным) «предыдущее» в последовательности открытых в модуле Анализа окно изображения.

Окно => Дублировать (Duplicate) Создает копию текущего выбранного изображения, которое может быть затем обработано независимо от исходного изображения.

Окно => Рядное расположение (Tile) Упорядочивает окна на экране, так что их позиции взаимно регулируются (окна занимают весь экран не накладываясь друг на друга).

Окно => Каскад (Cascade) Упорядочивает окна на экране, так что их позиции взаимно перекрываются.

РЕДАКТИРОВАНИЕ (УДАЛЕНИЕ) ДАННЫХ

Выбор Редактирование => Редактирование данных (Data Edit) вызывает панель редактирования данных, которая позволяет проводить четыре основных типа редактирования (вырезания): удаление ошибочных данных, нежелательных данных, шумовых выбросов и линий шумов.

Замечание. Изображение для редактирования должно быть двумерным. Наилучший результат будет достигаться при редактировании изображения до применения функции подсветки.




Существует четыре редактирующие функции, которые могут быть применены к двумерным изображениям. Если выбрана одна из этих опций, то курсор при расположении его над редактируемым изображением сменится на перекрестие. После применения функции, операция может быть отменена при нажатии на кнопку Undo в рабочей панели. При нажатии на кнопку Original изображение возвращается к своему начальному состоянию. После применения редактирующей функции необходимо нажать на кнопку Exit для выхода в модуль анализа изображения. После совершения редактирования данных вы также можете вернуть изображение к своему состоянию до редактирования выбором предыдущей версии изображения в буфере.

Редактирование данных => Усреднение крупных объектов (Coarse Pixel Averaging)

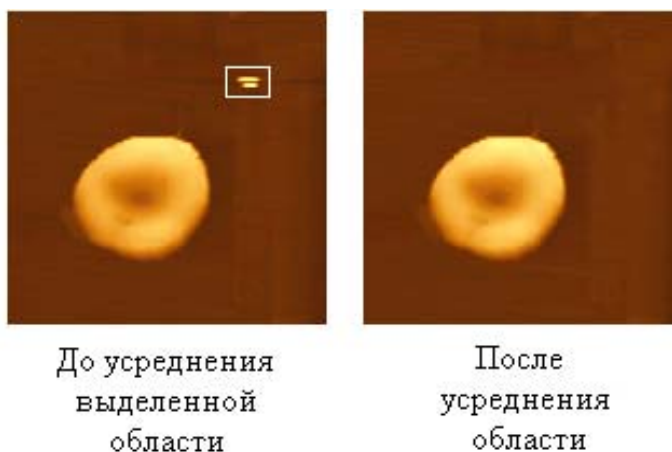
Позволяет определять область вокруг ошибочных или нежелательных данных и устранять их путем заполнения выделенной области усредненными значениями окружающих точек. Эта операция может быть повторена необходимое количество раз для полного удаления нежелательного объекта.



1. После выбора операции, нажатием на кнопку  в рабочей панели, переместите курсор на изображение. Нажмите левую кнопку мыши и, не отпуская ее, выделите область для коррекции необходимого размера.

2. Отпустите кнопку мыши и расположите выделенную область вокруг объекта, который вы хотите устранить. При необходимости вы можете переопределить необходимую область, нажатием левой кнопки мыши и ее новым выделением. Таким образом, может быть выбрана отдельная точка или большая область на изображении.


3. Щелкните правой кнопкой мыши для применения функции внутри выделенной области.



Редактирование данных => Редактирование отдельной линии (Single Line Editing)

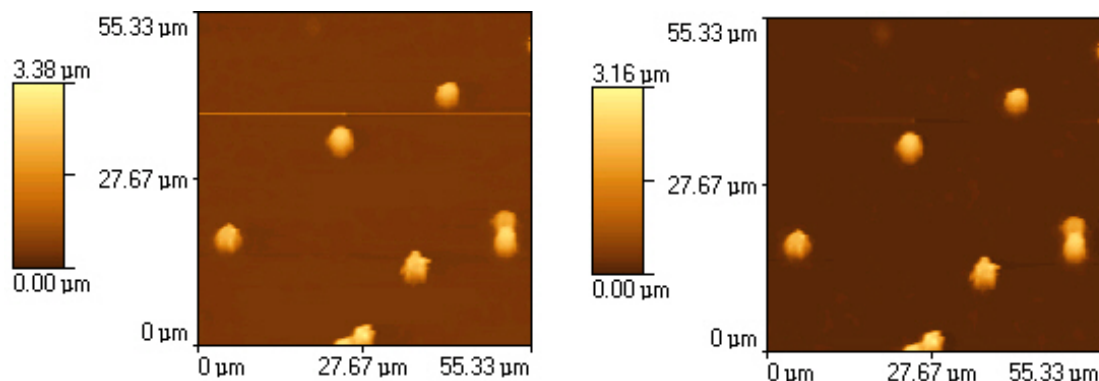
Использует такой же алгоритм усреднения, что и операция Усреднения крупных объектов, за исключением того, что функция применяется к отдельной горизонтальной линии на изображении. После применения функции каждая точка на всей линии заменяется усредненными значениями точек, лежащих непосредственно выше и ниже этой линии. Эта операция может быть полезна для удаления полос и горизонтальных линий шумов из изображения.



1. После выбора операции, нажатием на кнопку  в рабочей панели, переместите курсор на изображение. Нажмите левую кнопку мыши, при этом перекрестие превратится в линию.

2. Удерживая левую кнопку мыши, расположите редактирующую линию на полосу на изображении, которую необходимо устранить. При перемещении редактирующей линии над изображением, номер линии в скане под курсором будет отображаться на панели Редактирования данных.


3. Отпустите кнопку мыши для применения функции.



Изображение до (слева) и после (справа) применения функции удаления линии.

Редактирование данных => Усреднение мелких объектов (Fine Pixel Averaging) Устраняет сбои (или выбросы) на изображении, используя алгоритм, который находит мелкие выбросы или крупные точки внутри выделенного участка, а затем заменяет их на усредненные окружающие «нормальные» Z данные. Поскольку алгоритм специфически выполнен для обнаружения малых, аномальных выбросов данных, эта операция обычно неэффективна для удаления больших, крупных особенностей.




1. После выбора операции, нажатием на кнопку  в рабочей панели, переместите курсор на изображение. Нажмите левую кнопку мыши и, не отпуская ее, выделите область для коррекции.

2. Отпустите кнопку мыши и расположите выделенную область вокруг объекта, который вы хотите устранить. При необходимости вы можете переопределить необходимую область, нажатием левой кнопки мыши и ее новым выделением. Может быть выбрана отдельная точка или большая область на изображении.

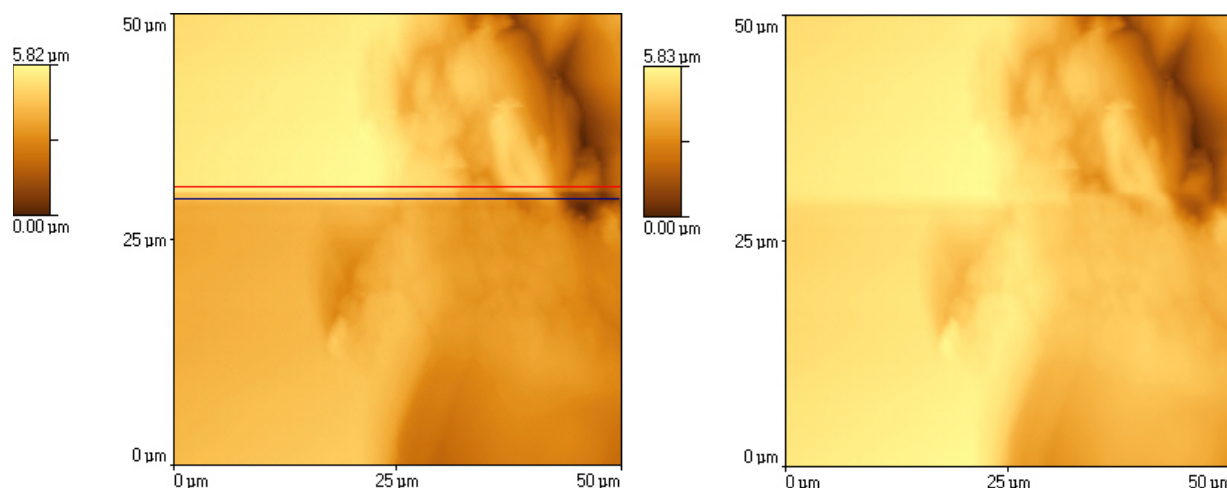
3. Щелкните правой кнопкой мыши для применения функции внутри выделенной области.

Редактирование данных => Удаление ступеньки (Step Removal) Позволяет выравнивать Z уровень двух или более горизонтальных ступенек на изображении. Иногда эффект появления ступеньки связан с подцеплением зондом дополнительной массы или с поломкой части зонда в процессе сканирования изображения. Результатом будет изменение среднего Z уровня на части изображения – независимое от реальной топографии.



1. После выбора операции, нажатием на кнопку  в рабочей панели, переместите курсор на изображение. Нажмите левую кнопку мыши, при этом перекрестие превратится в линию. Удерживая левую кнопку мыши, расположите первую редактирующую линию с одной стороны (непосредственно сверху или снизу) от ступеньки на изображении.

2. Нажмите левую кнопку мыши и, удерживая ее, расположите вторую редактирующую линию с другой стороны от ступеньки. Отпустите левую кнопку мыши, после чего программа исключит различие в высотах между первой и второй выделенными линиями.

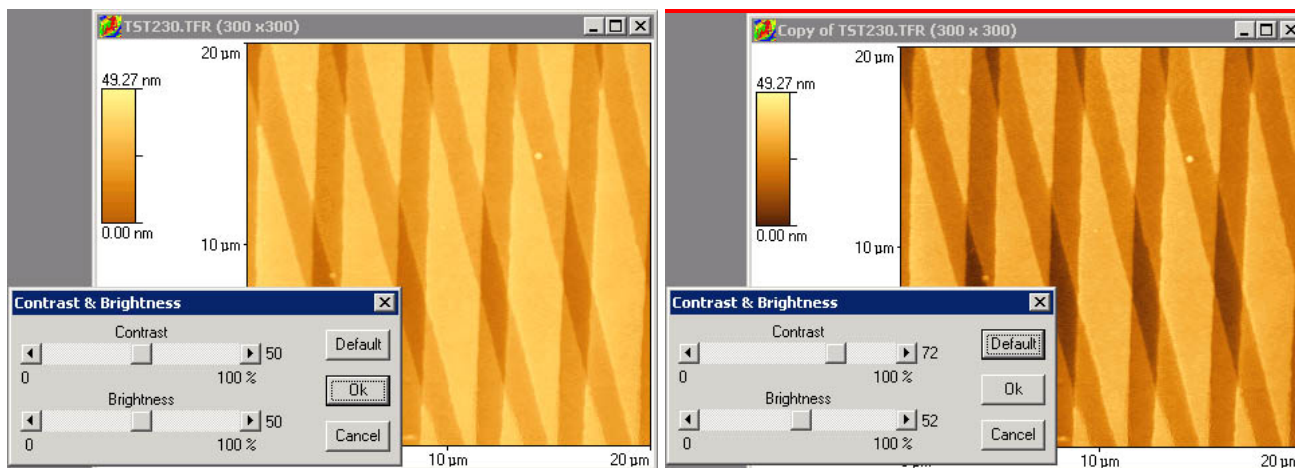


Изображение до (слева) и после (справа) применения функции удаления ступеньки.


Применяя функции Редактирования данных необходимо помнить, что при редактировании точек (пикселей) на изображении происходит также изменение данные сканирования. Поэтому при сохранении результатов обработки, необходимо убедиться, чтобы исходные необработанные данные сканирования были доступны.

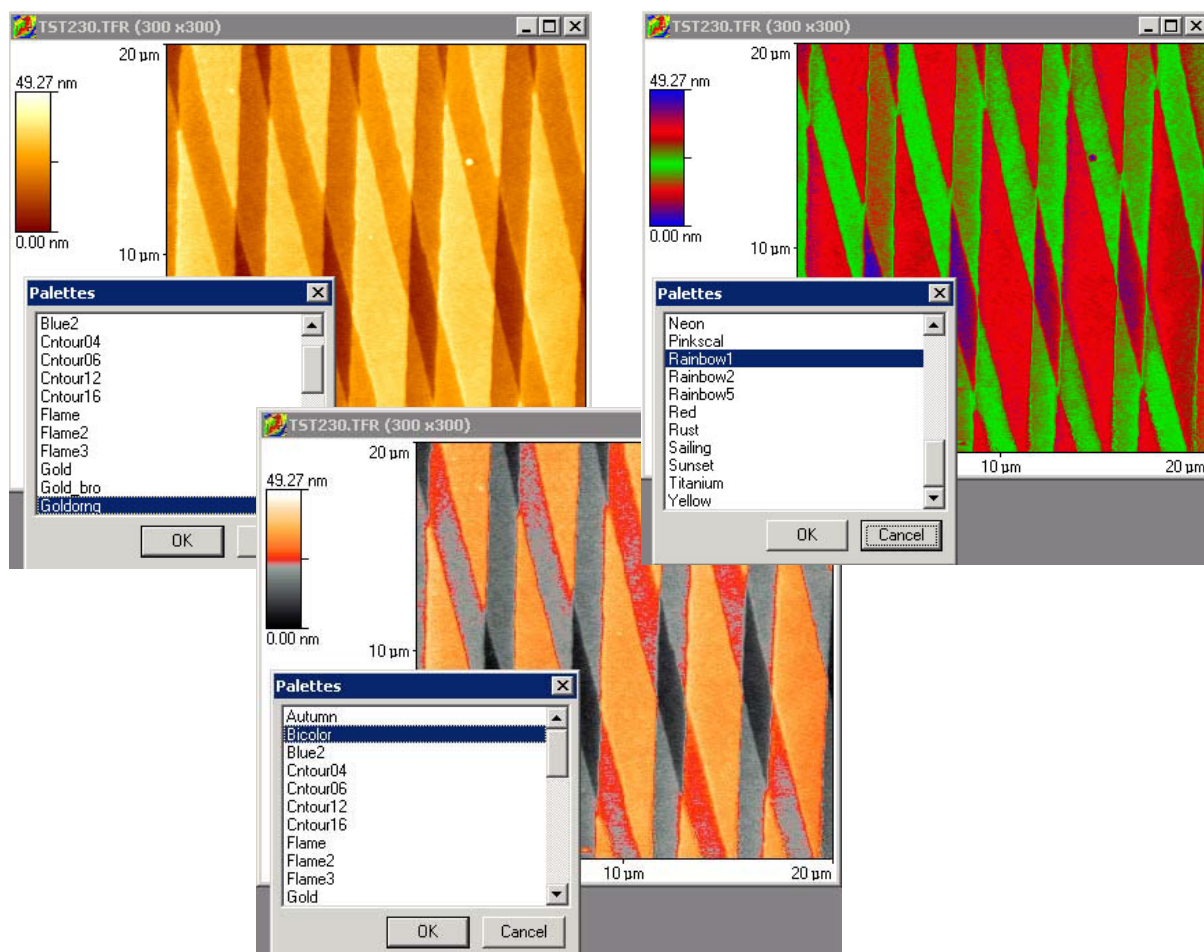
КОНТРАСТ И ЯРКОСТЬ.

Выбор Отображение => Контраст и яркость (Contrast and Brightness) вызывает панель Контраст и яркость, которая позволяет изменять обе эти характеристики с помощью ползунка и наблюдением результата на изображении. Для возвращения к исходным значениям, нажмите на кнопку Начальное значение (Default). Контраст и яркость не изменяют палитру изображения.



ЦВЕТОВЫЕ ПАЛИТРЫ.

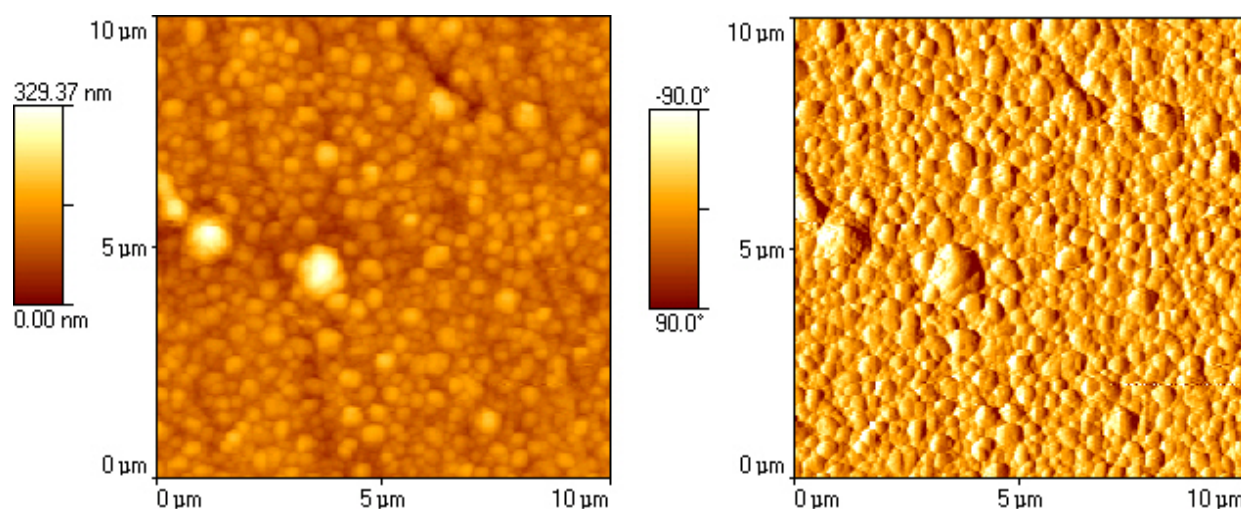
Вы можете применить к изображению несколько встроенных или определенных пользователем (с помощью функции Редактирования палитры) палитр выбором **Отображение => Палитры (Palettes)**, которая вызывает панель Палитр. Это позволяет выбирать различные палитры для наилучшего представления важных характеристик образца. Меню палитр также может быть вызвано нажатием кнопки  в рабочей панели.



Цветовые палитры не сохраняются в файле данных каждого изображения. Любое открываемое или просматриваемое в Диспетчере файлов изображение всегда отображается в текущей выделенной палитре – независимо от того, какая палитра была применена к исходному изображению.

ОТТЕНЕНИЕ (ПОДСВЕТКА).

Функция оттенения позволяет делать изображение более контрастным, создавая мнимый световой источник, который существенно изменяет детали изображения, делая ярче одни и оттеняя другие.

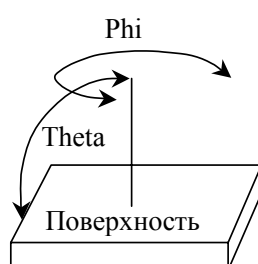


Панель оттенения, доступная при выборе Изображение => Оттенение (Shading), позволяет автоматически, слева или справа, или произвольно выбирать вектор позиционирования источника света.

- Автоматическое оттенение слева/справа – выбором Тень слева (Left Shade) или Тень справа (Right Shade) моделируется световой источник слева или справа от изображения под углом 45 градусов. Автоматическое оттенение слева/справа может быть так же применено

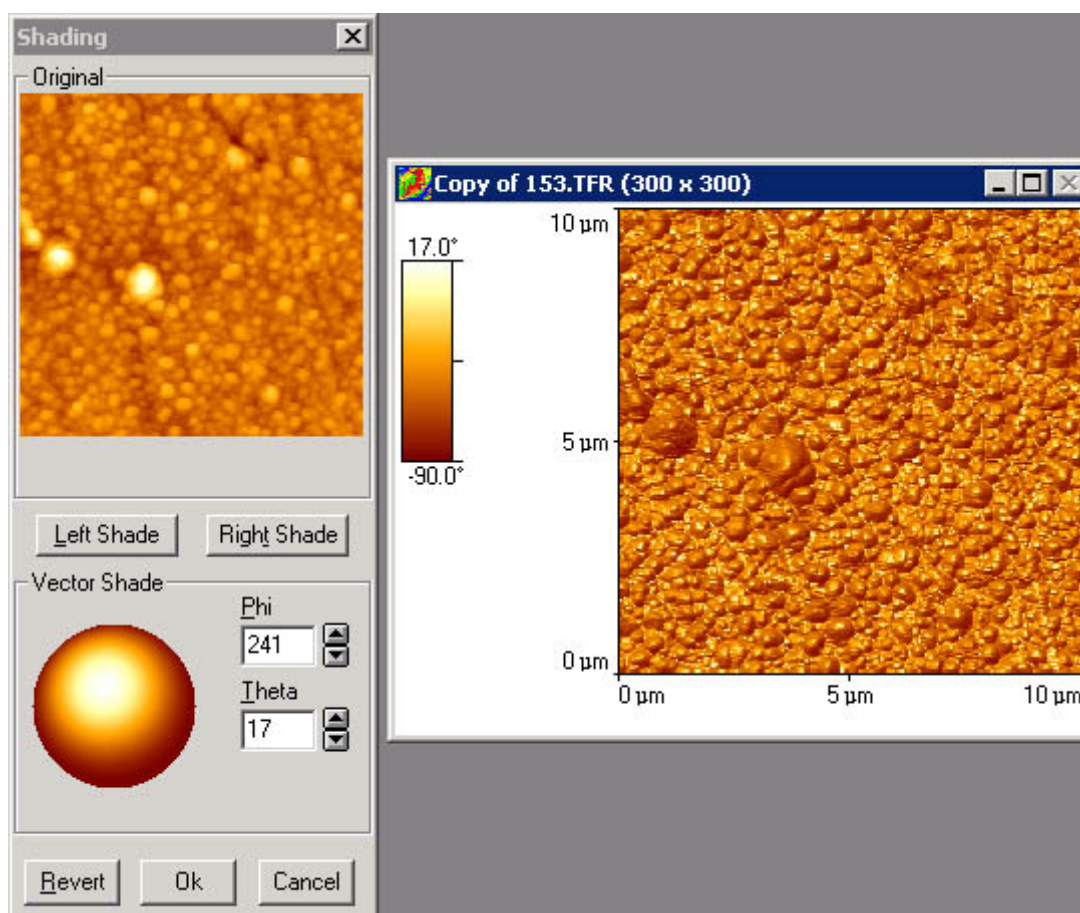
нажатием кнопки  или  на рабочей панели, соответственно.

- Направленное оттенение – позволяет свободное перемещение светового источника в пределах сферической области с помощью мыши при нажатии ее левой кнопки. Установление положения источника света осуществляется освобождением кнопки мыши, при этом соответствующие значения углов появляются в областях Phi и Theta, а результат подсветки можно наблюдать на изображении.




Угол Theta устанавливает положение источника относительно плоскости поверхности – в пределах от -90° до $+90^\circ$, 0° соответствует точке непосредственно над образцом. Phi – угол поворота источника света относительно вертикальной оси – изменяется от 0° до 360° .

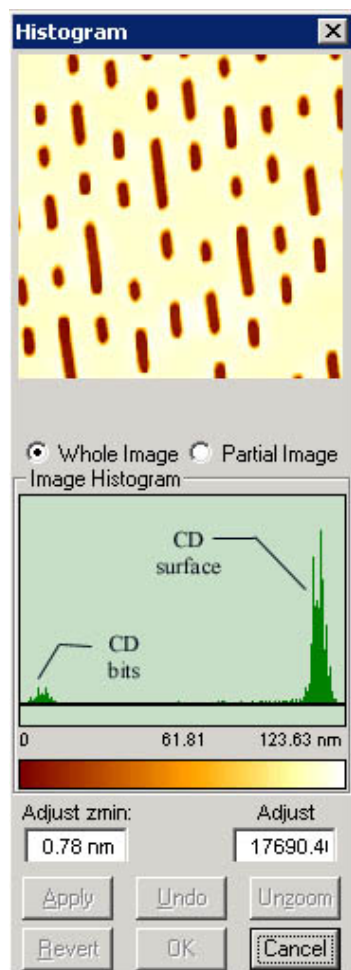
Важно помнить, что когда изображение подсвечено, цветовая шкала больше не представляет информации о Z высоте. Она может быть использована только для определения угла падения света на поверхность.



ГИСТОГРАММА ДАННЫХ (ЦВЕТОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТ).

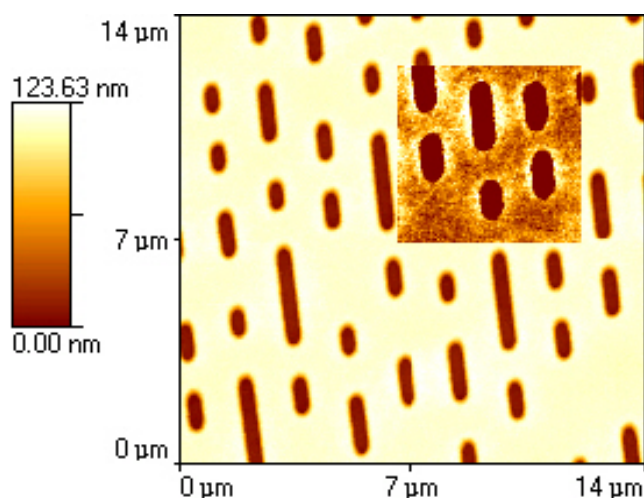
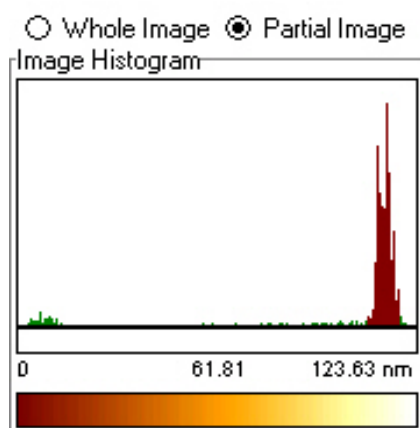
Функция цветовой гистограммы позволяет ограничивать распределение цветовой палитры в интересующем Z-интервале данных. По умолчанию цветовая палитра распределяется линейно по всему Z-интервалу. На многих сканах, однако, существуют достаточно глубокие ямки или высокие выступы, на которые приходится большая часть цветового распределения, что делает трудным разрешение мелких деталей, занимающих незначительную часть интервала (поверхность вокруг ямки или дно ямки).

Выбор Отображение => Гистограмма (Histogram) вызывает панель гистограммы, которая позволяет использовать гистограмму данных для определения части Z-интервала, на который будет распределена основная часть цветовой палитры. Эта функция также становится доступной при нажатии кнопки  на рабочей панели.



Например, на изображении компакт-диска (CD disc) слева основная часть цветовой палитры приходится на стенки ямки, при этом поверхность диска (CD Surface) и дно ямок (CD Bits) занимают лишь незначительную часть в цветовом распределении, что не позволяет рассмотреть мелкие детали на этих поверхностях.

Нижний рисунок иллюстрирует как изменяется изображение основной поверхности диска при распределении цветовой палитры в интересующем интервале Z-данных. На этом изображении вся цветовая гамма палитры (от черного к белому) распределена в выбранном интервале высот. Эта опция может быть применена ко всему или части изображения. В этом случае не интересующие особенности выше и ниже выделенного Z-интервала будут окрашены в белый и черный цвет.



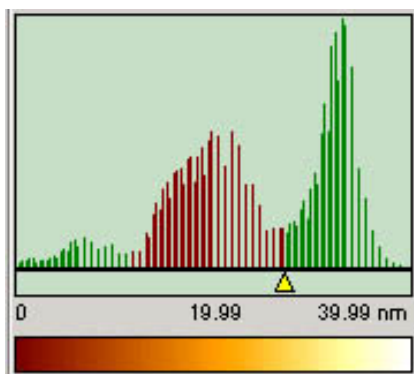
Применение функции гистограммы ко всему изображению:

1. Подведите курсор к области под гистограммой слева от области данных, которую вы хотите выделить. Нажмите левую кнопку мыши и удерживайте ее, при этом курсор превратится в треугольник.

2. Выделите интересующую вас область высот, освободите левую кнопку мыши.


При необходимости выделения нескольких областей на гистограмме, повторите пункты 1 и 2.

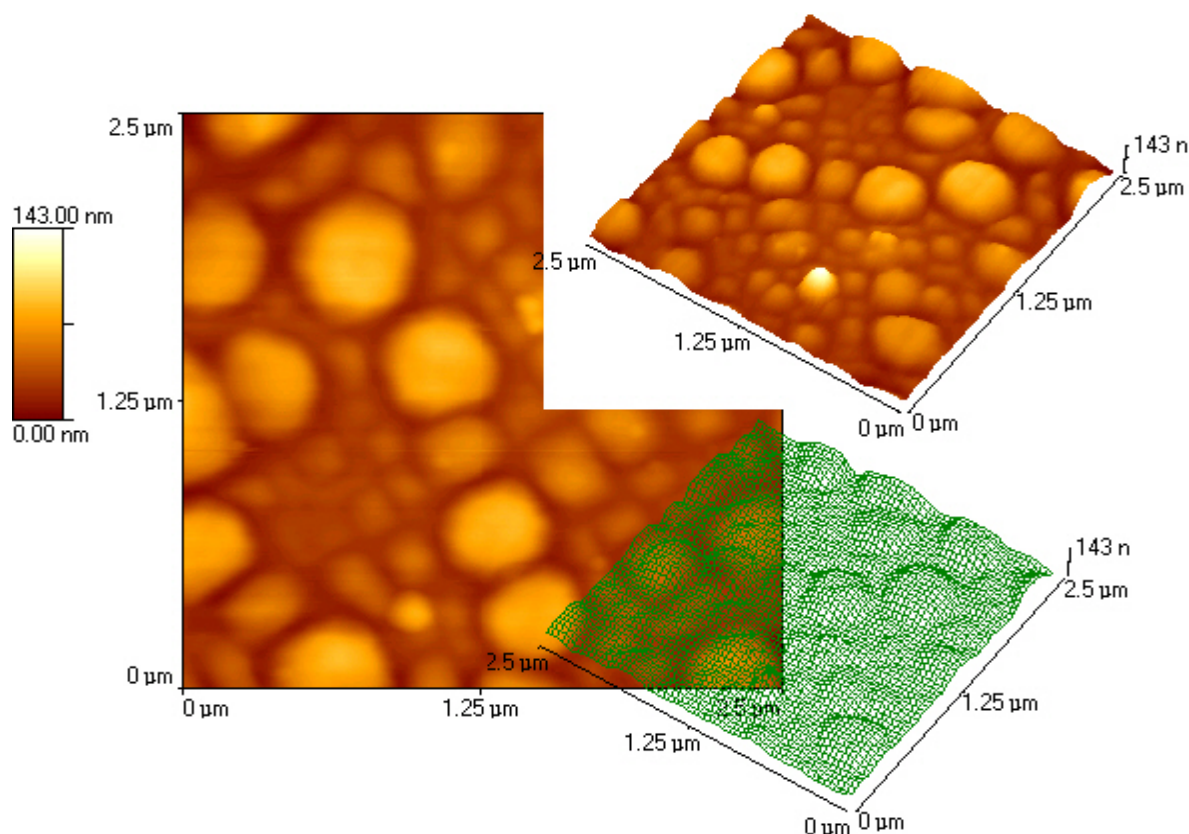
3. Нажмите кнопку Apply для перераспределения цветовой палитры в интересующем Z-интервале данных.



Вы можете зуммировать часть Z-интервала определяя верхний и нижний пределы в областях Adjust Zmin и Adjust Zmax. Для сброса выделенной области до применения функции нажмите кнопку Undo. После применения функции вы можете нажатием на кнопку Unzoom вернуться к исходному цветовому распределению (полной гистограмме).

ГРАФИКА (ТРЕХМЕРНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ).

В дополнение к стандартному двумерному построению, активное изображение может быть построено в трехмерном виде под различными углами зрения. Функция доступна выбором Отображение => Графика (Graphic), которая вызывает панель трехмерного построения. Эта функция также становится доступной при нажатии кнопки  на рабочей панели.

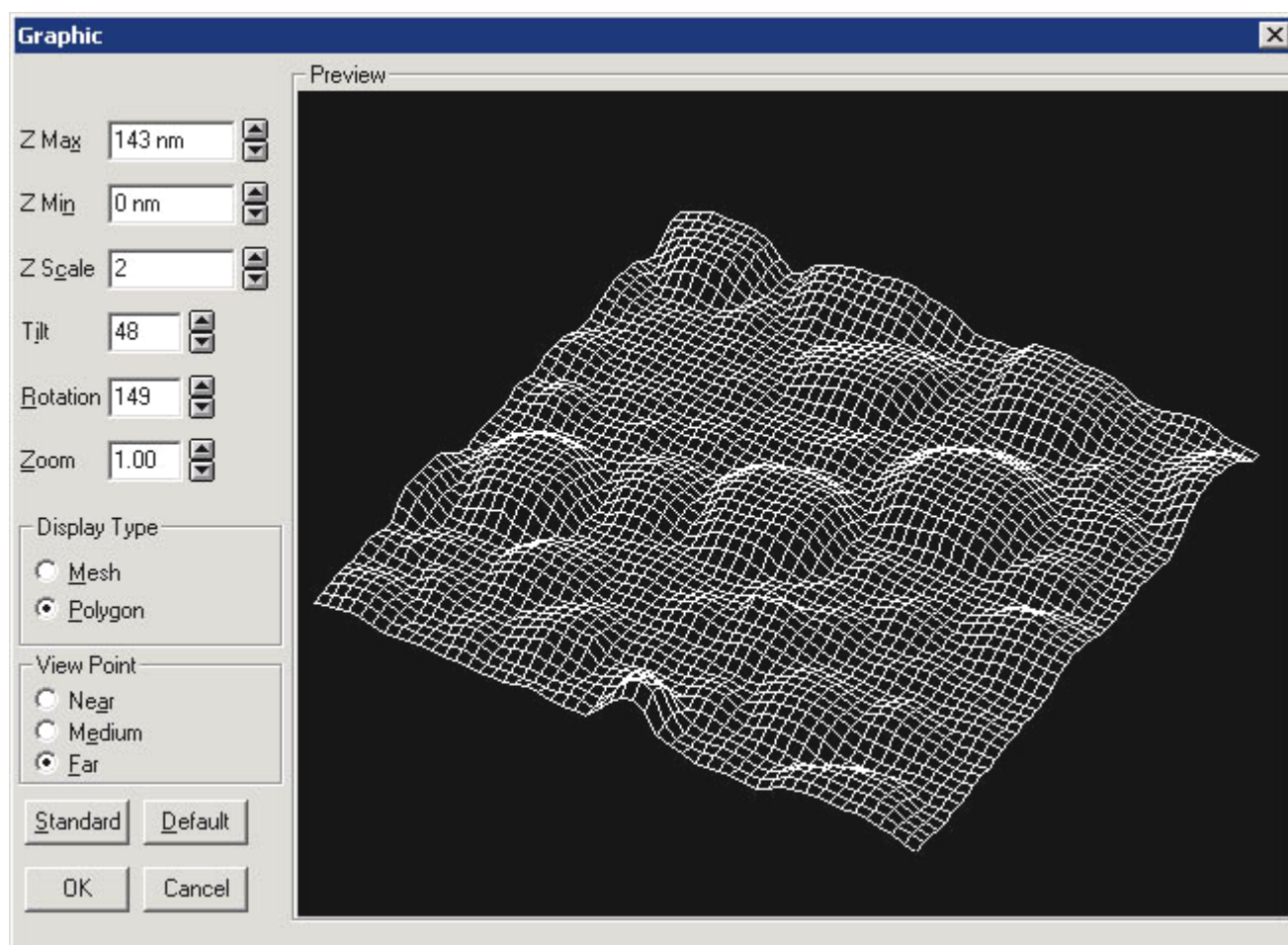


Могут быть доступны следующие виды представления изображения:

Сетка (Mesh) – представляет изображение в виде трехмерной сетки линий в X и Y направлениях.

Полигон (Polygon) – для трехмерной версии используется полная цветовая палитра аналогично двумерному изображению.

Представление в виде сетки осуществляется значительно быстрее, чем полигональное и обычно используется для предварительного просмотра типа ориентации.



Точка наблюдения может быть выбрана вблизи (Near), на среднем расстоянии (Medium) или вдали (Far) от плоскости поверхности изображения.

Параметры построения трехмерного изображения:

Z_{MAX}/Z_{MIN} – позволяет представлять изображение внутри интересующего вас Z интервала данных, обрезая данные выше и ниже максимально и минимально установленных. Начальные значения соответствуют полному Z интервалу.

Z Scale (Z масштабирование) – регулирует масштабный фактор, используемый при построении высоты деталей в 3D изображении. Эта функция обычно используется для преувеличения высоты, когда детали очень малы по сравнению с X , Y размером изображения, так что образец кажется гладким. При значении, равном 1, масштабирование не используется, т.е. отношение X/Y к Z -высоте будет 1:1. Например, детали на изображении с Z -высотой 10 нм будут казаться вдвое выше при установлении значения Z Scale, равным 2, по сравнению с реальным соотношением (но отображаться будет высота 10 нм).

Tilt And Rotation (наклон и поворот) – изменяет ориентацию изображения. Это может быть сделано вручную путем подвода курсора в окно предварительного просмотра (в результате чего курсор превращается в руку), нажатием и удержанием левой кнопки мыши, и

изменением положения изображения. При этом в областях Tilt и Rotation появляются значения, соответствующие данному положению изображения.

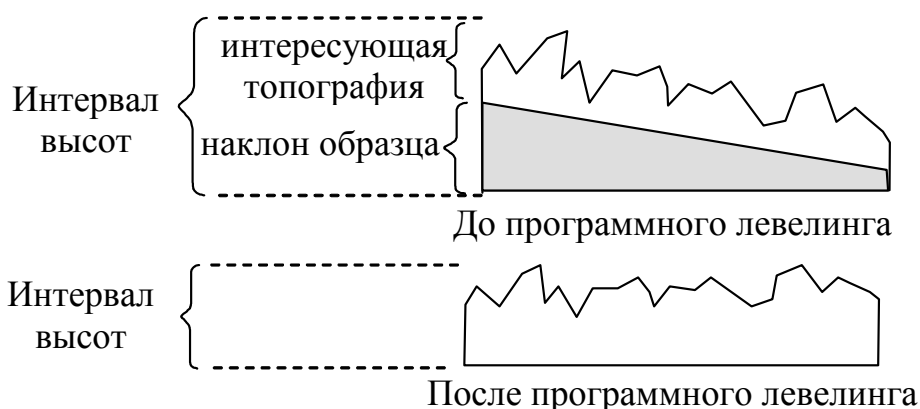
Zoom – позволяет зуммировать (увеличивать изображение) при виде из данной точки наблюдения, наклоне и повороте изображения с помощью значения, указываемого в поле Zoom (возможные значения 1-5).

Standard (стандарт) – возвращается к стандартным значениям точки наблюдения, наклону и углу поворота изображения.

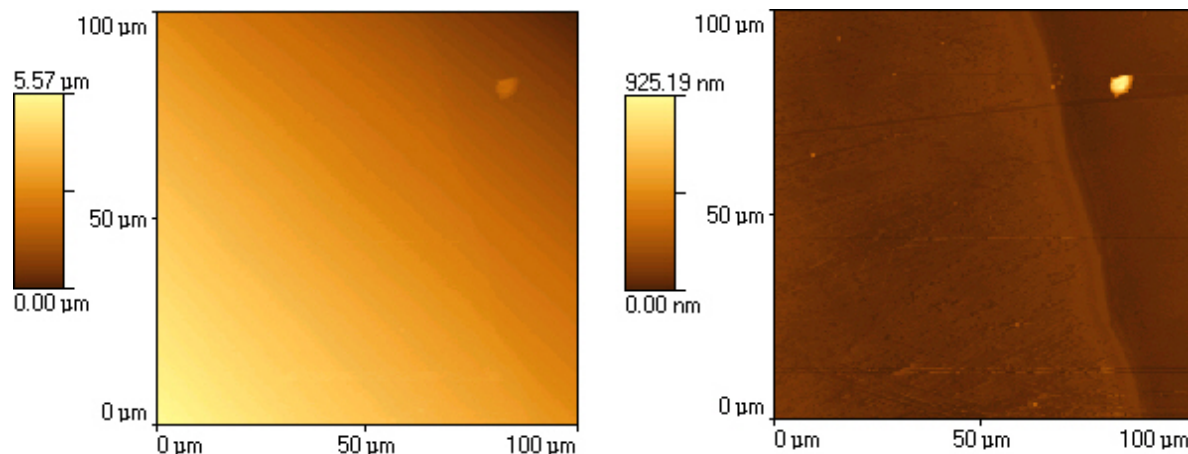
Default (значение по умолчанию) – возвращается к изначально установленным значениям точки наблюдения, наклону, углу поворота изображения и другим параметрам функции трехмерного изображения.

ЛЕВЕЛИНГ (ВЫПРАВНИВАНИЕ, LEVELING).

Левелинг – это процесс, с помощью которого вы можете автоматически или вручную определять плоскость, относительно которой будут отображаться ваши данные. Поскольку большинство режимов сканирующей зондовой микроскопии характеризуют топографию поверхности абсолютной Z-высотой относительно некоторой «нулевой» точки, на Z значение в измеренной точке поверхности будет непосредственно влиять наклон образца. Установить образец идеально ровно обычно не представляется возможным из-за очень малых масштабов, на которых работает СЗМ (100 мкм и меньше). Однако с помощью процесса левелинга можно программным способом компенсировать наклон образца, что позволяет точно измерять Z-высоту вдоль образца без дополнительной ненужной информации.

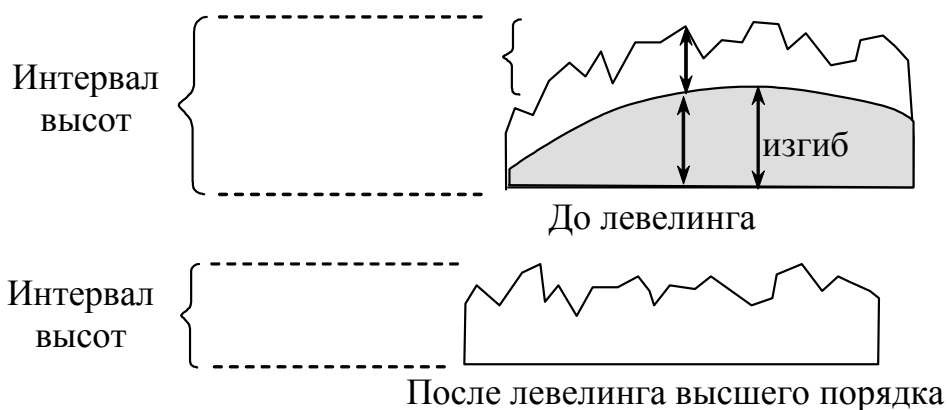



В некоторых сканах Z-интервал, занимаемый наклоном образца, может быть близок, или намного превышать (как на примере на рисунке ниже) Z-интервал интересующей топографии. В этом случае цветовая шкала будет представлять в основном интервал высот, соответствующий наклону, что делает затруднительным разрешение топографических деталей на поверхности.



Топография поверхности до (слева) и после (справа) проведения левелинга. Заметно устранение наклона образца, улучшение разрешения поверхностных деталей и изменение в полном Z-интервале.

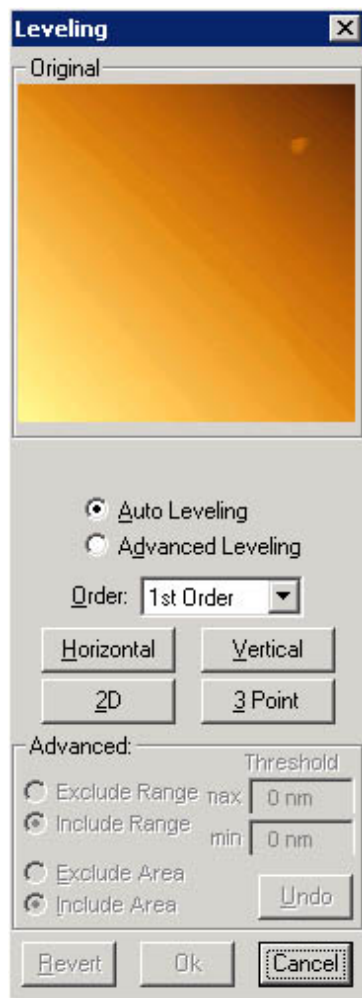
Левелинг первого порядка, как показано выше, выравнивает скан плоскостью. Левелинг второго и высшего порядков корректирует изгиб образца подгонкой данных к кривой.



Для многих изображений достаточным является основной одноступенчатый левелинг. Этот процесс проводит левелинг первого порядка одной плоскостью ко всему образцу, используя алгоритм наименьших квадратов для подбора плоскости изображения и последующего ее устранения. Эта функция применяется так же при нажатии кнопки  на рабочей панели. Выбор Обработка => Левелинг вызывает панель левелинга, которая содержит различные параметры настройки автоматического и усовершенствованного левелинга.

Автоматический левелинг (Auto Leveling).

Автоматический левелинг позволяет проводить следующие четыре вида выравнивания: Горизонтальный (Horizontal), Вертикальный (Vertical), Двумерный (2D) или По трем точкам (3 Point).



Каждый режим выравнивания основан на вычислении сложного изгиба и наклона изображения. Алгоритм подгоняет каждую линию изображения к изгибу. Эта подобранная линия становится затем горизонтальной линией на изображении. На основе выбранного порядка существуют следующие уравнения для подгоночных линий:


- 1-й порядок: $Z=ax+b$
- 2-й порядок: $Z=ax^2+bx+c$
- 3-й порядок: $Z=ax^3+bx^2+cx+d$
- 4-й порядок: $Z=ax^4+bx^3+cx^2+dx+e$
- 5-й порядок: $Z=ax^5+bx^4+cx^3+dx^2+ex+f$
- 6-й порядок: $Z=ax^6+bx^5+cx^4+dx^3+ex^2+fx+g$

Горизонтальный (Horizontal) – функция левелинга применяется для каждой горизонтальной линии сверху вниз изображения на основе значения, указанного в поле Порядок (Order). Возможны вычисления от 1-го до 6-го порядка.

Вертикальный (Vertical) – функция левелинга применяется для каждой вертикальной линии слева направо изображения на основе значения, указанного в поле Порядок (Order). Возможны вычисления от 1-го до 6-го порядка.

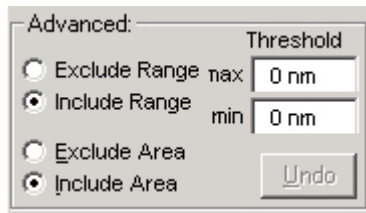
Двумерный (2D) – выравнивает данные в обоих x и y направлениях. Возможны вычисления от 1-го до 3-го порядка на основе следующих уравнений:

- 1-й порядок: $Z=ax+by+c$
- 2-й порядок: $Z=ax^2+by^2+cxy+dx+ey+f$
- 3-й порядок: $Z=ax^3+by^3+cx^2y+dxy^2+exy+fx+gy+h$

При нажатии кнопки  на рабочей панели применяется функция левелинга плоскостью (2D) первого порядка.

Три точки (3 Point) – функция левелинга по трем точкам позволяет выбирать три точки в любом месте изображения, которые будут определять плоскость, по которой изображение будет выровнено. Левелинг по трем точкам особенно хорошо подходит для выравнивания изображений со «ступеньками». Для использования функции: нажмите на кнопку Три точки (3 Point); затем укажите три точки на изображении нажатием левой кнопки мыши, в которых вы хотите определить уровень плоскости. После указания третьей точки левелинг будет применен.

Усовершенствованный левелинг (Advanced Leveling).



Усовершенствованный левелинг позволяет включать или исключать определенный Z интервал при применении процесса левелинга. Функция также позволяет включать или исключать один или несколько участков на изображении.

Вы можете использовать оба метода вместе. После того, как вы определите площадь/Z-интервал, по которому вы хотите провести левелинг, выделенные части скана будут выделены зеленым.

Определение Z интервала. Функция Z интервала позволяет вам определять тот интервал высот на изображении, который будет учитываться при выравнивании. Вы можете сделать это либо исключив данный интервал из вычислений, либо включив данный интервал. Для определения соответствующего интервала может потребоваться несколько попыток.

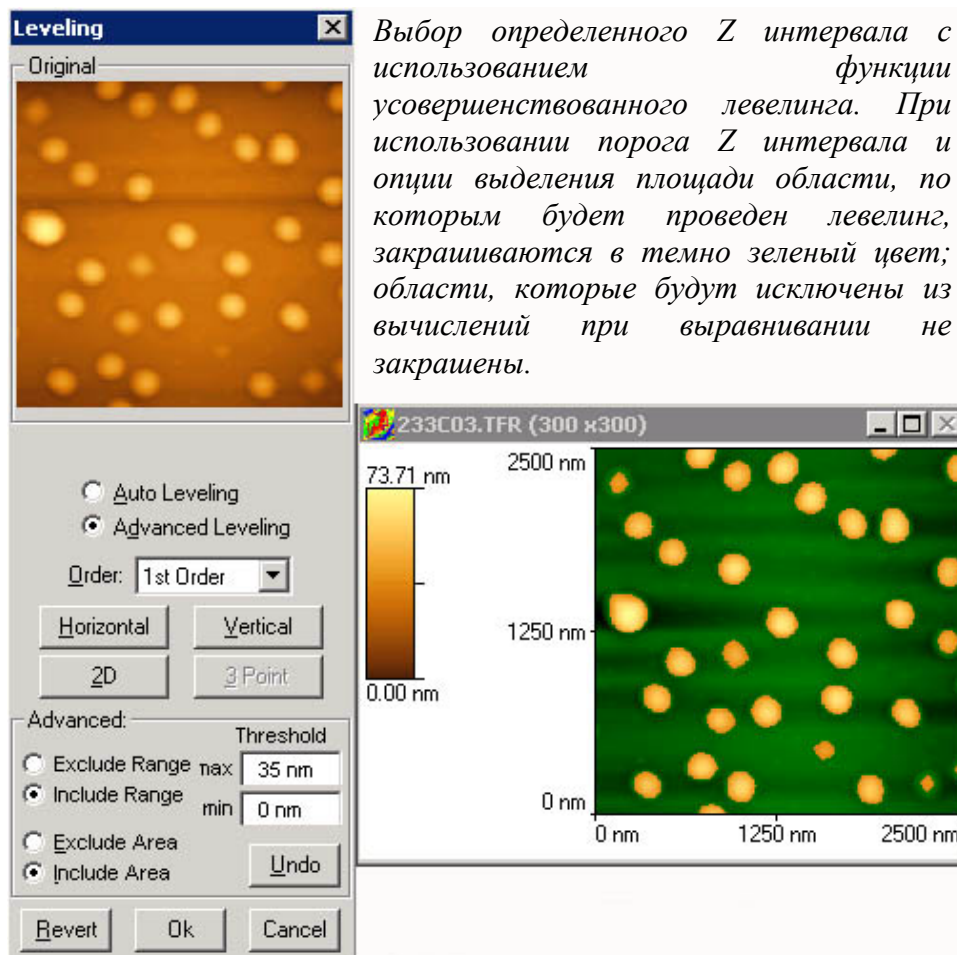
1. Выберите опцию Исключить интервал (Exclude Range) или Включить интервал (Include Range).
2. Введите минимальное и максимальное значения интервала в поле Порог (Threshold).

После выбора включаемой/исключаемой из процесса левелинга площади/интервала она будет выделена зеленым. При необходимости возможно регулирование минимального и максимального значения порога.

Определение площади. Функция Площади позволяет вам вручную выделять участки, которые вы хотите включить или исключить из процесса левелинга.

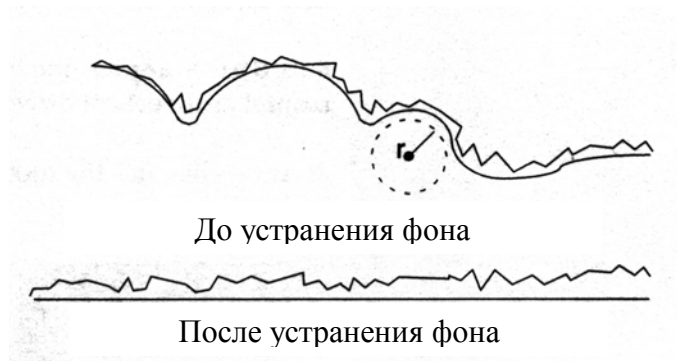
1. Выберите опцию Исключить область (Exclude Area) или Включить область (Include Area).
2. Разместите курсор мышки над изображением (при этом он превратится в перекрестие), нажмите левую кнопку и, не отпуская ее, выделите область необходимого размера. Отпустите левую кнопку мыши и разместите выделенный блок в желаемом месте.
3. Нажмите правую кнопку мыши (при этом выделенный фрагмент будет закрашен зеленым). При необходимости можно выделять несколько областей.

Нажмите на кнопку Горизонтальный (Horizontal), Вертикальный (Vertical) или Двумерный (2D) левелинг для применения функции левелинга к определенной области.

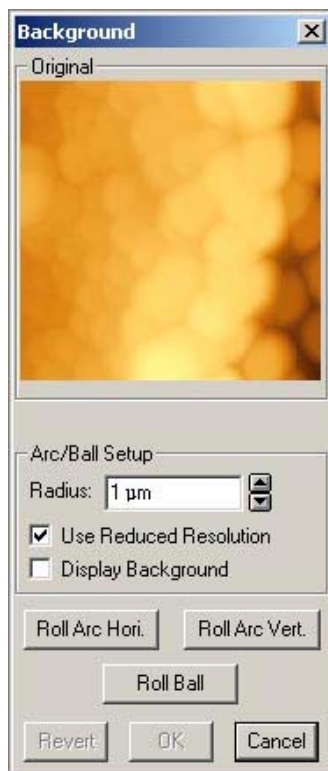


УСТРАНЕНИЕ ФОНА (BACKGROUND SUBTRACTION).

Устранение фона – это процесс фильтрации, устраняющий детали из фона образца. Процесс использует алгоритм, который применяет окружность в вертикальном или горизонтальном направлениях, или сферу в обоих направлениях с обратной стороны изображения, и вычитает подповерхностные детали, которые больше или равны заданному пользователем радиуса окружности/сферы. Компенсируя высоту больших деталей, процесс становится полезным средством для разрешения мелких деталей на поверхности образца.



Функция становится доступной при выборе Обработка => Устранение фона (Background...).



Параметры функции.

Радиус (Radius) – установка радиуса окружности или сферы, который будет применен к изображению. Чувствительность к деталям зависит от радиуса применяемой окружности/сферы. В качестве значения радиуса лучше использовать доминирующий размер особенностей в изображении. Анализ линии (Анализ => Анализ линии (Line Analysis...)) может быть полезен в определении размера крупных деталей до задания радиуса. Важно помнить, что установление слишком маленького значения радиуса может иметь нежелательный эффект, устраняя мелкие особенности на изображении. Устанавливаемое по умолчанию значение – 10% от размера изображения.

Использовать уменьшенное разрешение (Use Reduce Resolution) – измеряется не во всех точках изображения, ускоряется время процесса.

Отображать фон (Display Background) – используется алгоритм, который отображает устранимый фон вместо остающихся деталей (после совершения функции прокатки).

Прокатка окружности горизонтально (Roll Arc Hori.) – применяется алгоритм вычитания фона в горизонтальном направлении.

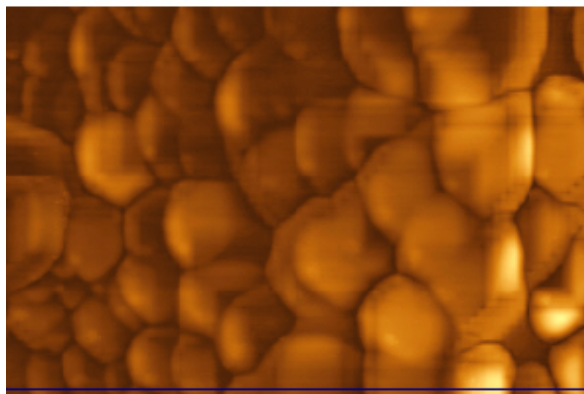
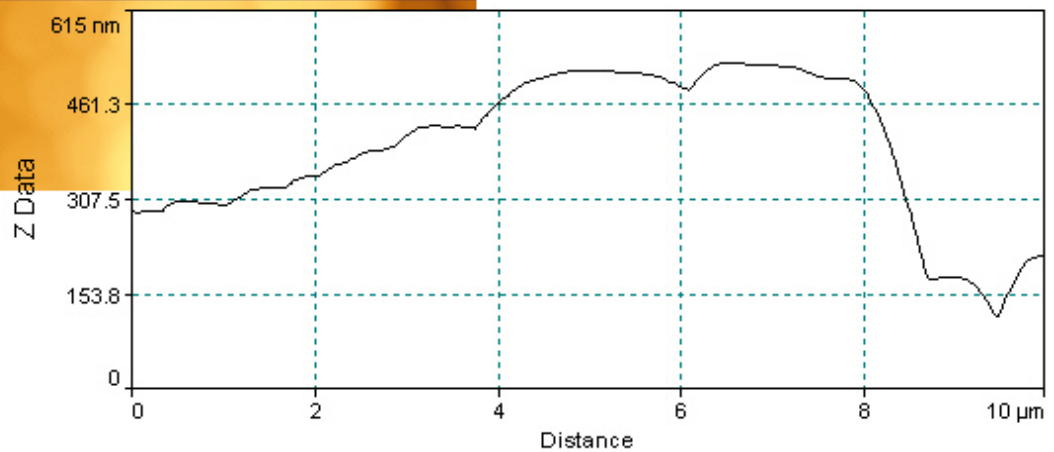
Прокатка окружности вертикально (Roll Arc Vert.) – применяется алгоритм вычитания фона в вертикальном направлении.

Прокатка шара (Roll Ball) – применяется алгоритм вычитания фона в обоих горизонтальном и вертикальном направлениях.

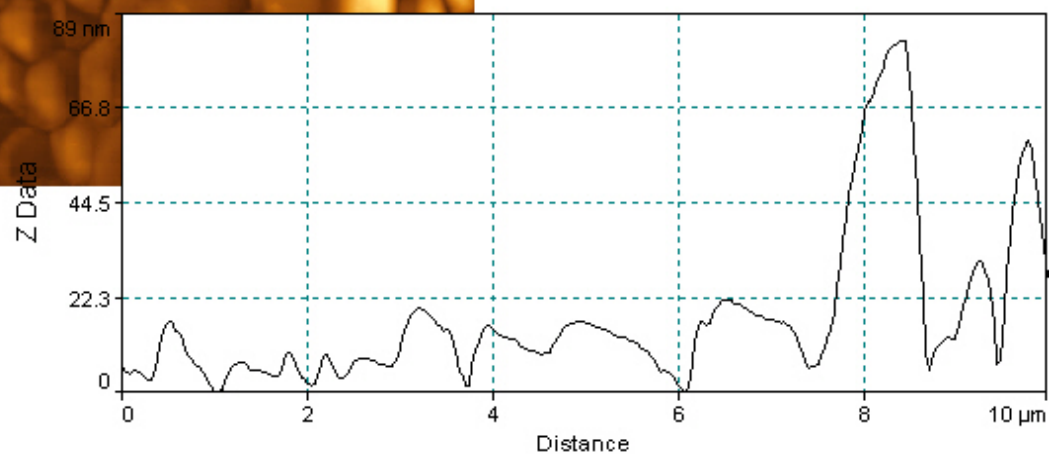
Возврат (Revert) – отменяет последнюю сделанную операцию, возвращает изображение к своему оригинальному состоянию.



Изображение (слева) и профиль
линии (снизу) до применения
функции устранения фона



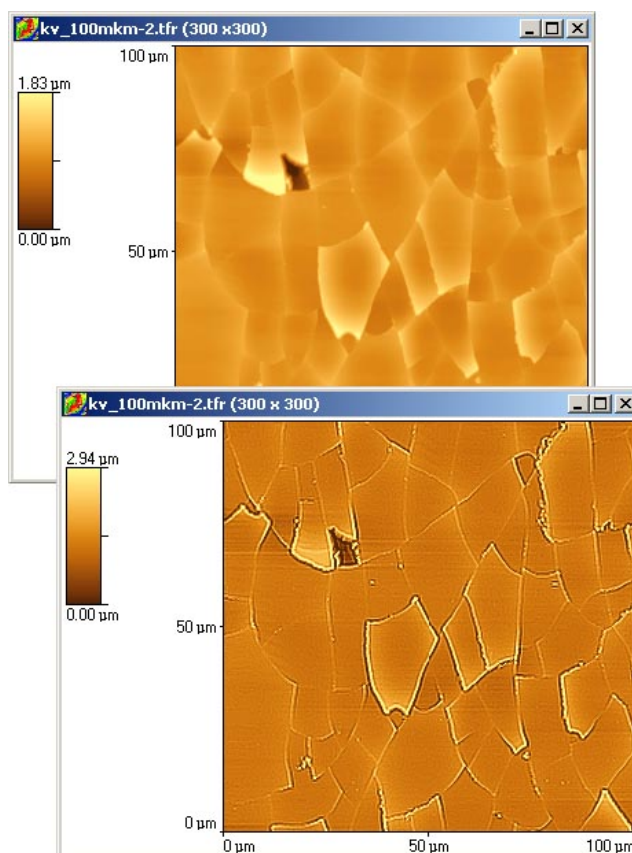
Изображение (слева) и профиль
линии (справа) после применения
функции устранения фона



КОНВОЛЮЦИЯ (СВЕРТКА, CONVOLUTION)

Функция конволюции позволяет вам применять к изображению функции сглаживания, заострения или другие функции фильтрации. Операция вычисляется от точки к точке из

стандартной kern-функции, kern-функции, заданной пользователем, или из библиотеки kern-функций. (Замечание: крайние точки модифицируются отличным способом из-за ограниченного числа соседних точек). Выбор Обработка => Конволюция (Convolution...) вызывает панель конволюции.



Топография до (вверху) и после (внизу) применения функции конволюции заострения.

Керн-функция – это матрица чисел, используемая для изменения

1	1	1
1	X	1
1	1	1

точки в ее центре. Например, керн-функция 3x3 для сглаживания должна иметь вид, показанный на рисунке слева. Большее значение X меньше сглаживает (больше заостряет) изображение, т.к. внешние точки имеют меньшее влияние на центральную точку, что приводит к меньшему сглаживанию.

Процесс фильтрации осуществляется с помощью математической модификации каждой точки, используя окружающие точки как базис для применения матрицы фильтрации (керн-функции). Для этого процесса используется следующее уравнение:

$$P_n = \frac{\sum_{i=1}^m P_i F_i}{\sum_{i=1}^m F_i}$$

Где:

P_n = Новое значение точки

m = номер точки в выбранной матрице

P = текущее значение точки

F = фильтрующий фактор для точки согласно керн-функции

Кернфункция задается одним из трех способов:

1. Выберите Заострение (Sharpen) или Сглаживание (Smooth). Применяется стандартная кернфункция – матрица выбранного размера (3x3, 5x5 или 7x7) со следующими значениями:

- Сглаживание

Все значения матрицы = 1

X=3 для матриц всех трех размеров

- Заострение

Все значения матрицы = -1

Для матрицы 3x3 X=12

Для матрицы 5x5 X=28

Для матрицы 7x7 X=52

2. Загрузите кернфункцию из библиотеки выбрав функцию Загрузить (Load). Будет отображена выбранная матрица. Нажмите Применить (Apply) для применения выбранной кернфункции к изображению.

3. Создайте новую кернфункцию (или модифицируйте одну из существующих) введением значений в каждой конкретной ячейке. Новая кернфункция может быть сохранена в библиотеке нажатием кнопки Сохранить (Save). Нажмите Применить (Apply) для применения созданной кернфункции к изображению.

Выбор Возврат (Revert) возвращает оригинальное изображение.

Выбор функции Значение по умолчанию (Default) вызывает кернфункцию (3x3, 5x5 или 7x7), которая является сглаживающей матрицей, основанной на введенном значении X.

ФИЛЬТРАЦИЯ (FILTER).

Операция фильтрации позволяет вам фильтровать изображение от точки к точке используя процесс низкой, средней или высокой фильтрации. Эта функция полезна для устранения шумов в отдельных точках или улучшения разрешения деталей на некоторых изображениях. Лучшим методом определения возможных параметров функции для конкретного скана является экспериментирование при ее использовании. Выбор Обработка => Фильтрация (Filter...) вызывает панель фильтрации.

При фильтрации осуществляется замена центральной точки в квадратной матрице (3x3, 5x5 или 7x7) на низшее, среднее или высшее Z значение (в зависимости от выбранного фильтра) из всех точек матрицы. Процесс фильтрации повторяется для каждой точки на изображении.



- При выборе Низкий (Low) значение X заменяется наименьшим значением в матрице.

- При выборе Высокий (High) значение X заменяется наибольшим значением в матрице.

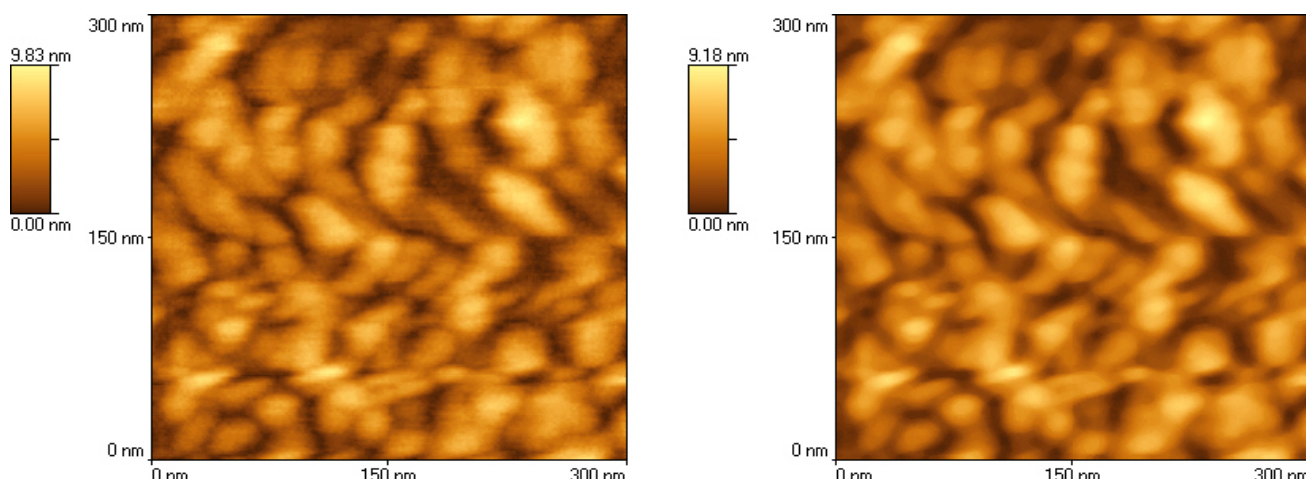
4	1	3
1	2	5
1	2	1

➔

4	1	3
1	5	5
1	2	1

Применение матрицы 3x3 для функции высокой фильтрации.

- При выборе Средний (Medium) значение X заменяется средним значением в матрице. (Эта функция особенно полезна для устранения шумов в отдельных точках).



Пример изображения до (слева) и после (справа) фильтрации

– использован высокий фильтр 7x7.

МАСШТАБИРОВАНИЕ И ЗУММИРОВАНИЕ (SCALE & ZOOM).

Функция Масштабирование и зуммирование дает простой способ зуммирования отдельной области на изображении с последующим заданием разрешения нового увеличенного изображения. Кроме этого вы можете изменить разрешение некоторого изображения без применения функции зуммирования – например, с 300x300 на 500x500. Когда вы увеличиваете (или уменьшаете) разрешение изображения программа экстраполирует данные, создавая новое изображение, которое имеет задаваемое разрешением число точек данных. Это обеспечивает значительно лучшее разрешение, чем при простом растягивании окна изображения. Выбор Обработка => Масштабирование и зуммирование (Scale & Zoom...) вызывает панель изменения масштаба и зуммирования.

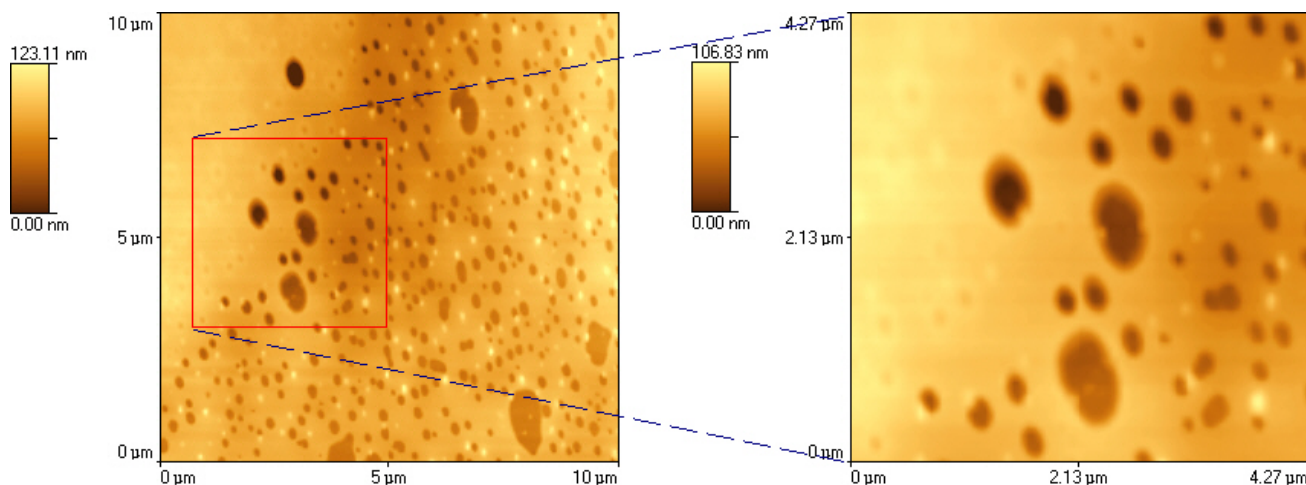


Замечание. При использовании функции Масштабирование и зуммирование не забывайте сохранить новое изображение в файле с новым именем, иначе исходный файл будет заменен.

Для зуммирования участка на отображаемом изображении:

1. Разместите курсор мышки над изображением (при этом он превратится в перекрестие), нажмите левую кнопку и, не отпуская ее, выделите область необходимого размера. Отпустите левую кнопку мыши и разместите выделенный блок в желаемом месте.
2. Нажмите правую кнопку мыши.
3. Выберите необходимое разрешение выделенной области.

Отзуммированное изображение будет отображено в том же окне, что и исходное изображение.



После зуммирования функция может быть повторно применена к новому изображению. Выбор Возврат (Revert) возвращает оригинальное изображение.

Для изменения размера изображения без использования функции зуммирования выберите Обработка => Масштабирование и зуммирование (Scale & Zoom...), затем нажмите на кнопку с соответствующим большим или меньшим разрешением.

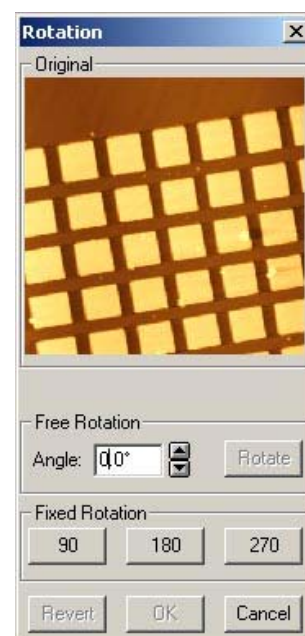
ПОВОРОТ (ROTATION).

Функция Поворота позволяет вам автоматически поворачивать отображаемое изображение с шагом в 90° или ручной поворот изображения. Выбор Обработка => Поворот (Rotation...) вызывает панель управления поворотом.

Имеется два возможных способа поворота:

- Фиксированный поворот позволяет переориентацию изображения с шагом в 90° без изменения его исходных размеров. Нажмите на кнопку 90, 180 или 270 для поворота на соответствующий угол.

- Свободный поворот позволяет вам поворачивать изображение с шагом в 1/10° или больше введением числа в поле Угол (Angle) или с использованием прокрутки. В окне изображения



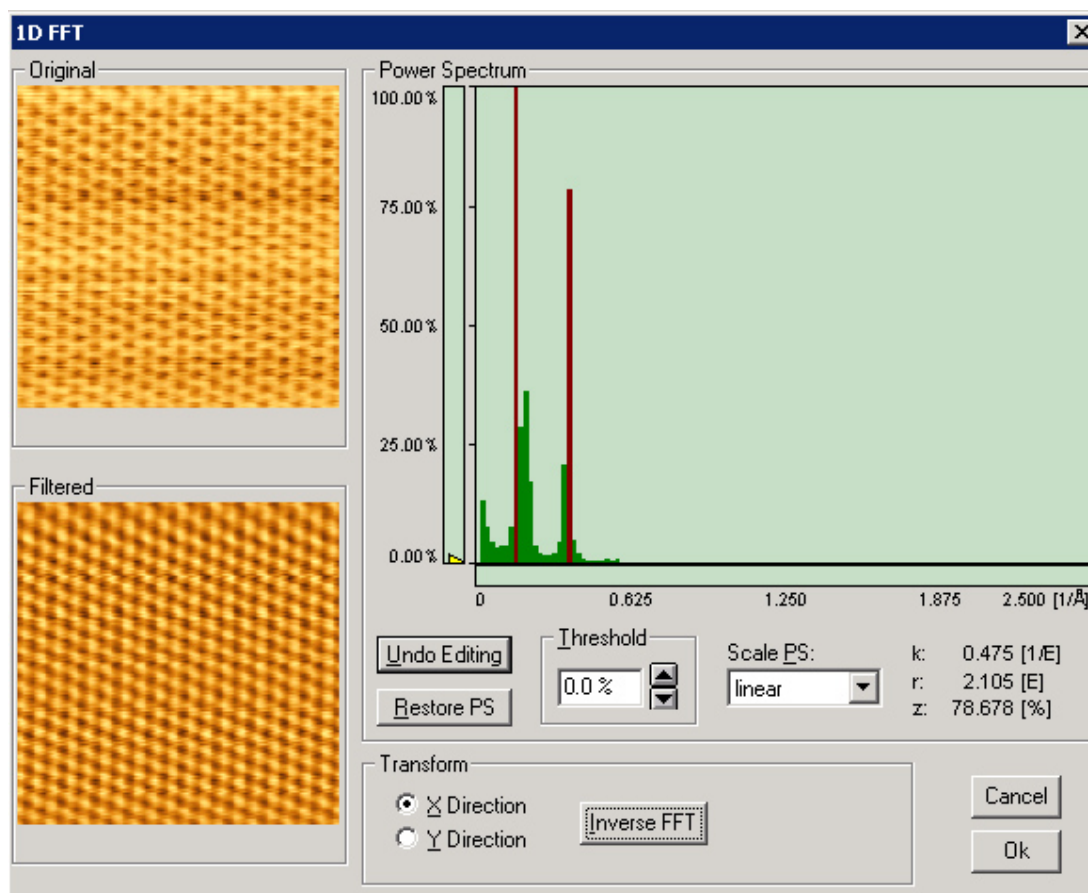
появятся границы, показывающие новую ориентацию. После установления соответствующего угла ориентации нажмите на кнопку Поворот (Rotate).

Замечание. Свободный поворот производится внутри ограниченного окна изображения, поэтому при отличии угла поворота от 90° будет производиться зуммирование изображения на необходимую для заполнения окна величину и соответствующее уменьшение полного размера скана.

Выбор Возврат (Revert) возвращает оригинальное изображение.

ОДНОМЕРНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ (1D FFT).

Функция 1D FFT позволяет отображать энергетический спектр быстрого преобразования Фурье выбранного изображения. Энергетический спектр может быть использован для фильтрации изображения на выделенных частотах независимо в X или Y направлении. Выбор Обработка => Одномерное преобразование Фурье (1D FFT) вызывает панель быстрого преобразования Фурье.



Энергетический спектр находится совершением быстрого преобразования Фурье по каждой линии в выбранном направлении (X или Y) и последующей нормализацией результатов всех линий. Важно помнить, что преобразование по двум осям производится независимо друг от друга.

Изначально энергетический спектр отображается в логарифмическом масштабе, однако масштаб (Scale PS) может быть изменен на линейный или корневой от второй до девятой

степени. Это может быть полезно для наилучшего отображения спектра при совершении операции преобразования.

Значения некоторых уровней на энергетическом спектре могут быть найдены следующим способом:

1. подведите курсор к области под энергетическим спектром слева от области частот, которую вы хотите выделить;
2. нажмите левую кнопку мыши и удерживайте ее, при этом курсор превратится в треугольник;
3. выделите интересующую вас область частот, освободите левую кнопку мыши.

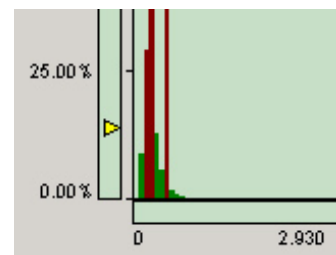
По положению курсора определяются следующие параметры:

- $k = 1 /$ (единица, определяемая размером скана) - волновое число;
- $r = 1 / k$;
- z = процент энергетического спектра. Максимальный пик принимается за 100%.

Обратное преобразование Фурье. Функция обратного преобразования Фурье используется для фильтрации нежелательных частот (обычно шума) в энергетическом спектре, и, таким образом, улучшения преобладающих деталей на изображении. Для совершения обратного преобразования Фурье:

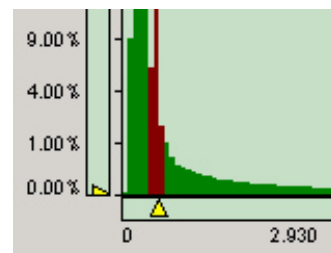
1. Выберите направление преобразования в области Transform (X или Y).
2. Выделите частоту или частоты, которые необходимо сохранить в процессе фильтрации. Имеется несколько способов, которые могут использоваться в комбинации или в отдельности:

- Определение порога. Желтая стрелка на вертикальной оси энергетического спектра может использоваться для определения точки, ниже которой все частоты будут удалены. Щелкните на нее и, удерживая левую кнопку мыши, определите необходимый уровень. Остающиеся частоты на энергетическом спектре будут выделены красным.



- Область Порог (Threshold) позволяет вам вводить определенное значение, ниже которого все частоты будут удалены. Остающиеся частоты на энергетическом спектре будут выделены красным.

- Определение частот. Для выделения отдельных частот щелкните на желтую стрелку на горизонтальной оси энергетического спектра и, удерживая ее, определите необходимый интервал частот. Эта операция может быть повторена несколько раз для выделения нескольких частот.



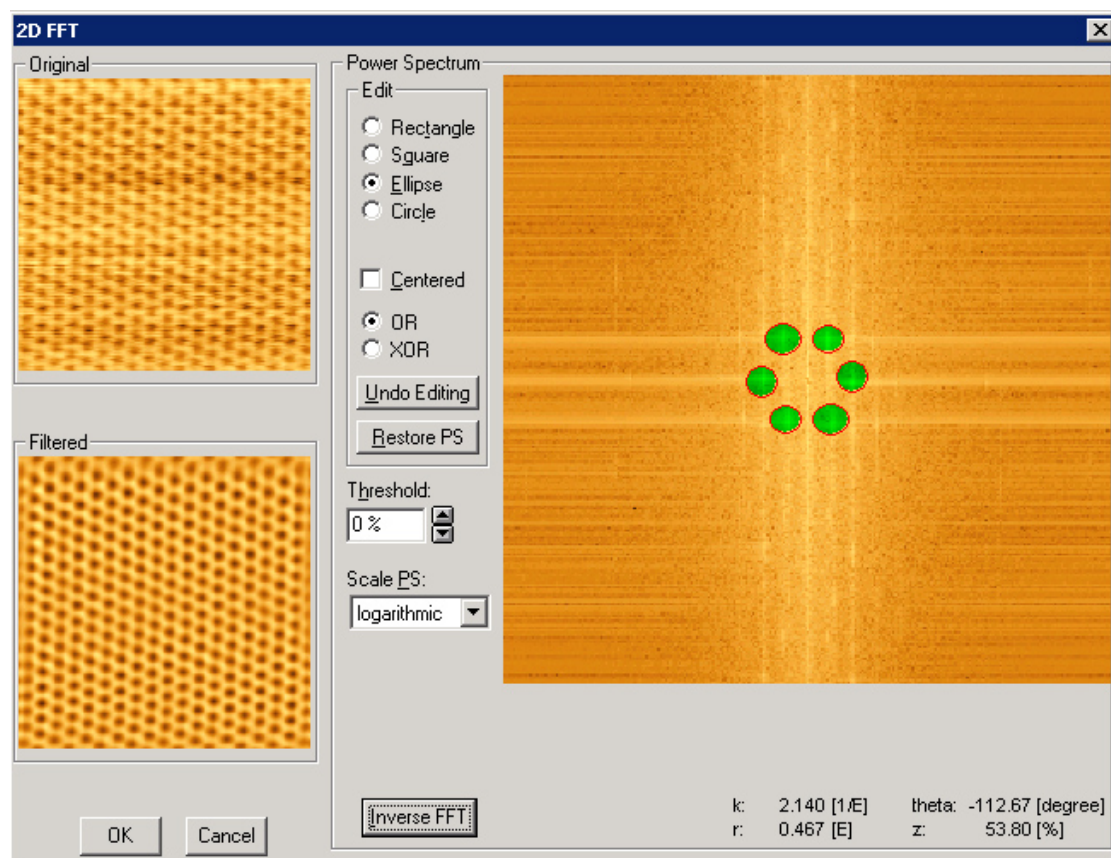
Эти три способа могут использоваться в комбинации. Кнопка Отмена редактирования (Undo Editing) используется для удаления последней операции выделения. Кнопка Восстановление энергетического спектра (Restore PS) возвращает исходный энергетический спектр для выделенного направления.

3. После выделения соответствующих частот нажмите на кнопку Преобразовать Фурье-спектр (Inverse FFT) для совершения процесса фильтрации.

ДВУМЕРНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ (2D FFT).

Функция 2D FFT позволяет отображать четырехквадрантный энергетический спектр быстрого преобразования Фурье выбранного изображения. Подобно функции 1D FFT (описанной выше) энергетический спектр двумерного преобразования Фурье представляет собой спектр одновременно для X и Y направлений. Этот спектр затем может быть использован для фильтрации изображения на выделенных частотах. 2D FFT наиболее часто используется для устранения шума из изображений с периодической структурой, таких как изображения с атомным разрешением. Кроме того, энергетический спектр может использоваться для определения параметров, таких как волновое число, тета, % энергетического спектра выше данной точки.

Выбор Обработка => Двумерное преобразование Фурье (2D FFT) вызывает панель быстрого преобразования Фурье. Эта функция также становится доступной при нажатии кнопки **FFT** в рабочей панели.



Отображаемый энергетический спектр является комбинацией Фурье-спектров в обоих X и Y направлениях. Каждая точка данных соответствует отдельной частоте в одном направлении. В энергетическом спектре 2D FFT диагональные квадранты являются «зеркальными изображениями».

Изначально энергетический спектр отображается в логарифмическом масштабе. Опция Масштаб энергетического спектра (Scale PS) позволяет вам изменять его на линейный или корневой от второй до девятой степени. Это функция не изменяет данные, но может быть полезна для наилучшего отображения деталей при совершении операции преобразования.

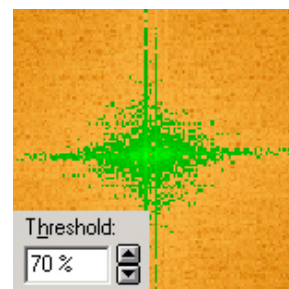
Значения некоторых точек на энергетическом спектре могут быть найдены по положению курсора, определяются следующие параметры:

- $k = 1 /$ (единица, определяемая размером скана) - волновое число;
- $r = 1 / k$;
- z = процент энергетического спектра. Максимальный пик принимается за 100%;
- θ (theta) = угол от центральной точкой, который соответствует низшей частоте.

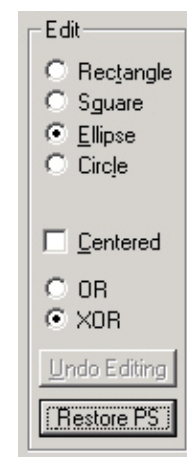
Обратное преобразование Фурье. Функция обратного преобразования Фурье используется для фильтрации нежелательных частот (обычно шума) в энергетическом спектре, и, таким образом, улучшения преобладающих деталей на изображении. Для совершения обратного преобразования Фурье:

1. Выделите частоту или частоты, которые необходимо сохранить в процессе фильтрации. Для этого имеется два основных способа:

- Область Порог (Threshold) позволяет вам вводить определенное значение, ниже которого все частоты будут удалены. Остающиеся частоты на энергетическом спектре будут выделены зеленым.
- Определение частот. Для определения отдельных частот может быть использовано выделение с использованием Прямоугольника (Rectangle), Квадрата (Square), Эллипса (Ellipse) и Окружности (Circle).



Если опция Центрировать (Centered) не выбрана, то выделение необходимых частот осуществляется следующим способом. Переместите курсор на Фурье-спектр, при этом он превратится в перекрестие. Нажмите левую кнопку мыши и, не отпуская ее, выделите область необходимого размера. Отпустите кнопку мыши и расположите выделенную область в области частот, которые вы хотите оставить на изображении. Щелкните правой кнопкой мыши для выделения интересующей области частот. Соответствующая область будет выделена зеленым в диагонально



противоположных квадрантах. Если выбрана опция Центрировать (Centered), то выделение необходимых частот осуществляется таким же способом, однако центр выделяемой области будет находиться в центре изображения.


Если выбрана опция OR, то перекрывающиеся области будут оставаться выделенными. Если выбрана опция XOR, то в перекрывающихся областях выделение снимается.

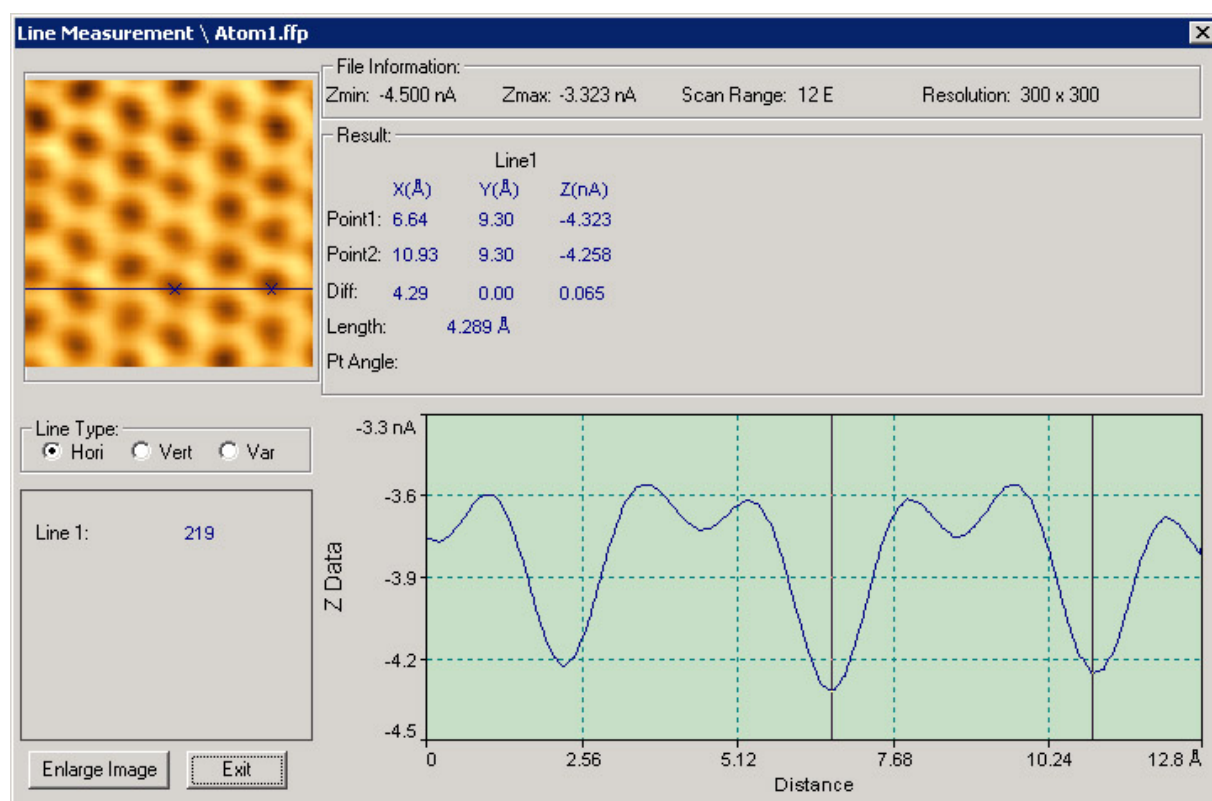
Процесс подбора параметров фильтрации заключается в выделении в спектре частот, представляющих интересующие детали изображения, и устранения посторонних данных и шумов. Зачастую это осуществляется методом проб и ошибок и требует нескольких попыток.

Функция Отмена выделения (Undo Editing) убирает подсвеченные области в порядке обратном последовательности выделения. Кнопка Восстановление энергетического спектра (Restore PS) возвращает исходный энергетический спектр.

2. После выделения соответствующих частот нажмите на кнопку Преобразовать Фурье-спектр (Inverse FFT) для совершения процесса фильтрации.

ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНИИ (LINE MEASURE).

Функция измерения линии позволяет проводить измерения вдоль выбранной пользователем линии на выделенном изображении. Вдоль профиля линии для некоторых положений могут быть получены X, Y и Z данные, а также расстояние между двумя точками и информация об угле. Выбор Анализ => Измерение линии (Analysis => Line Measure) вызывает панель профиля линии. Эта функция также становится доступной при нажатии кнопки  в рабочей панели.



В области Информация о файле (File Information) отображаются основные данные о скане, такие как размер скана, максимальные и минимальные значения Z , разрешение изображения.

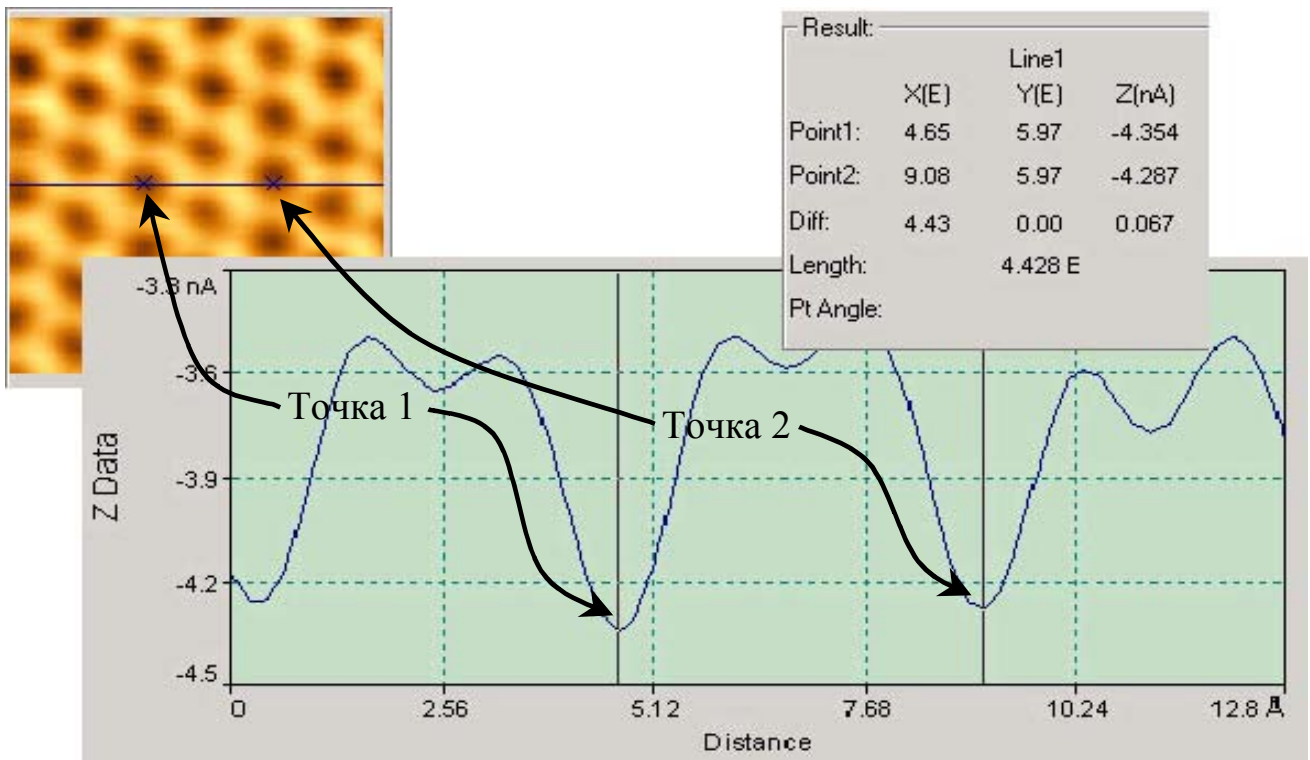
Для создания профиля линии выберите один из трех типов линии: Горизонтальный (Hori), Вертикальный (Vert) или Произвольный (Var). При выборе горизонтальной или вертикальной ориентации линии на изображении линия пересекает все изображение. Выбор произвольной ориентации позволяет вам создавать линию произвольной длины и размещать ее под произвольным углом для профилирования любой части изображения. Существуют следующие методы определения линии в зависимости от типа профиля линии:

- Для горизонтальных и вертикальных линий. Разместите курсор над изображением (при этом он превратится в перекрестие), нажмите левую кнопку мыши (перекрестие превратится в линию). В окне под изображением появится номер линии на скане. Удерживая левую кнопку мыши, разместите линию в месте, в котором вы хотите проанализировать профиль. Освободите левую кнопку мыши. Можно повторить выбор до трех линий одновременно. При выборе четвертой линии первые три будут стерты.

- Для произвольных линий. Разместите курсор над изображением (при этом он превратится в перекрестие), нажмите левую кнопку мыши и, удерживая ее, проведите линию нужной длины под интересующим вас углом. Освободите левую кнопку мыши. Разместите линию над интересующей вас деталью изображения и нажмите правую кнопку мыши для фиксации линии. При выборе нескольких линий, угол между соседними линиями будет показан в окне под изображением.

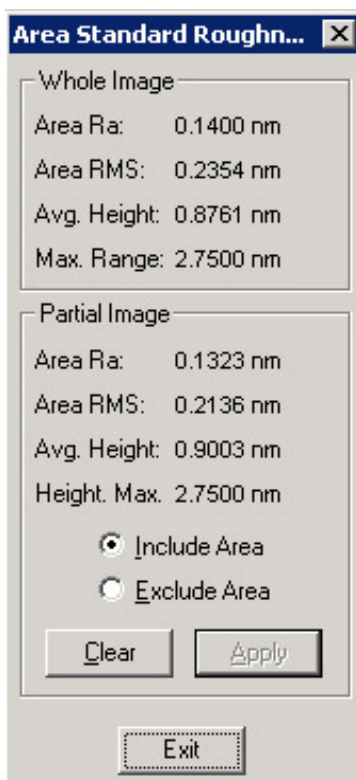
Для выполнения анализа профиля разместите курсор мыши над окном профиля линии. Нажмите левую кнопку мыши (при этом курсор превратится в вертикальную линию). Разместите линию на месте первого измерения и нажмите левую кнопку мыши для фиксации линии (при этом появится вторая линия). Повторите тот же процесс фиксации линии для второй точки измерения. Заметим, что точки измерения вдоль линии на изображении будут отмечены значком «X». Нажмите правую кнопку мыши для выхода из окна профиля линии. Следующая информация отображается для профиля линии:

- X , Y и Z значения для обеих точек.
- Разница по X , Y и Z между двумя точками.
- Длина линии между двумя точками.
- Угол наклона между двумя точками.



АНАЛИЗ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ (AREA STANDARD ROUGHNESS).

Выбор Анализ => Анализ площади => Шероховатость (Analysis => Area Analysis => Roughness) вызывает панель Анализа шероховатости поверхности. Возможно определение стандартных параметров шероховатости по всей площади скана (Whole Image) или части изображения (Partial Image), выделенной (Include Area) или за исключением выделенной (Exclude Area) на скане.



Выделение области для анализа осуществляется следующим способом. Поместите курсор над изображением, при этом он превратится в перекрестие. Нажмите левую кнопку мыши и, не отпуская ее, выделите область необходимого размера. Отпустите кнопку мыши и расположите выделенную границами область в интересующей части изображения. Щелкните правой кнопкой мыши для выделения интересующей области. После выделения области для анализа нажмите кнопку Применить (Apply). Для отмены выделения нажмите кнопку Очистить (Clear).

Стандартные параметры шероховатости:

Ra – средняя шероховатость (Roughness average) – среднее арифметическое отклонение:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i - \bar{Z}|.$$

RMS – среднеквадратичное отклонение (Root mean square):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i - \bar{Z}|^2}.$$



Avg. Height – средняя высота, \bar{Z} .

Max. Range – максимальный перепад высот, $Z_{\max} - Z_{\min}$.

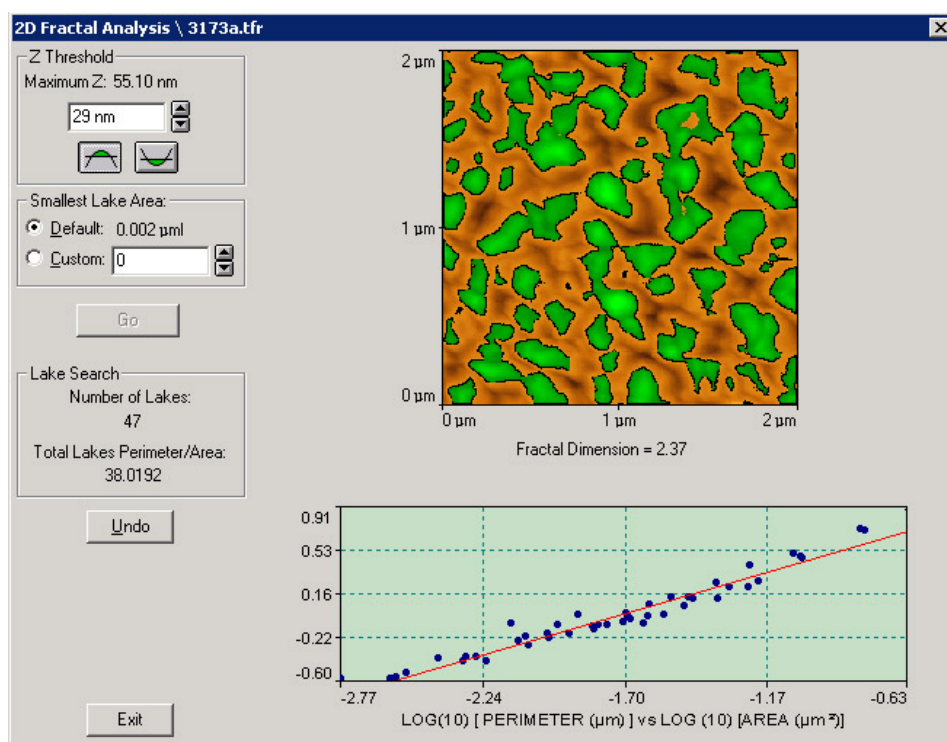
АНАЛИЗ ФРАКТАЛЬНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ (2D FRACTAL ANALYSIS).

Выбор Анализ => Анализ площади => Фрактальность (Analysis => Area Analysis => Fractal) вызывает панель Анализа фрактальности поверхности.

Порог среза (Z Threshold) устанавливается автоматически на уровне 50% от максимальной высоты на изображении. Для изменения этого параметра введите новое значение в поле Z Threshold.

Если нажата кнопка , то будут определяться и учитываться в вычислениях островки выше порога среза, если выбрана кнопка , то ниже этого значения. Для выбора задаваемого по умолчанию минимального значения площади островка, которые будут учитываться в вычислениях, выберите опцию По умолчанию (Default). Для самостоятельного определения этого значения нажмите По выбору (Custom) и введите значение в соседнее поле.

Для поиска удовлетворяющих заданным условиям островков нажмите на кнопку Искать (Go). Результаты отобразятся в областях Число островков (Number of Lakes) и Полное отношение периметр/площадь островков (Total Lakes Perimeters/Area). После подсчета числа островков совершается построение прямой в координатах $\log_{10}(\text{периметр})$ - $\log_{10}(\text{площадь})$ и вычисление значения фрактальной размерности (Fractal Dimension) по наклону этой прямой.



Для сброса полученных результатов нажмите на кнопку Отмена (Undo).

Определение фрактальной размерности. Алгоритм, используемый для анализа площади на фрактальность, основан на работе J.M. Gomez-Rodriguez*. Используемый метод основывается на распознавании структуры островка на Z плоскости, секущей изображение. Оценивается соотношение между двумя параметрами для каждого островка – периметр (L) и площадь (A). Фрактальная размерность (D) определяется как:

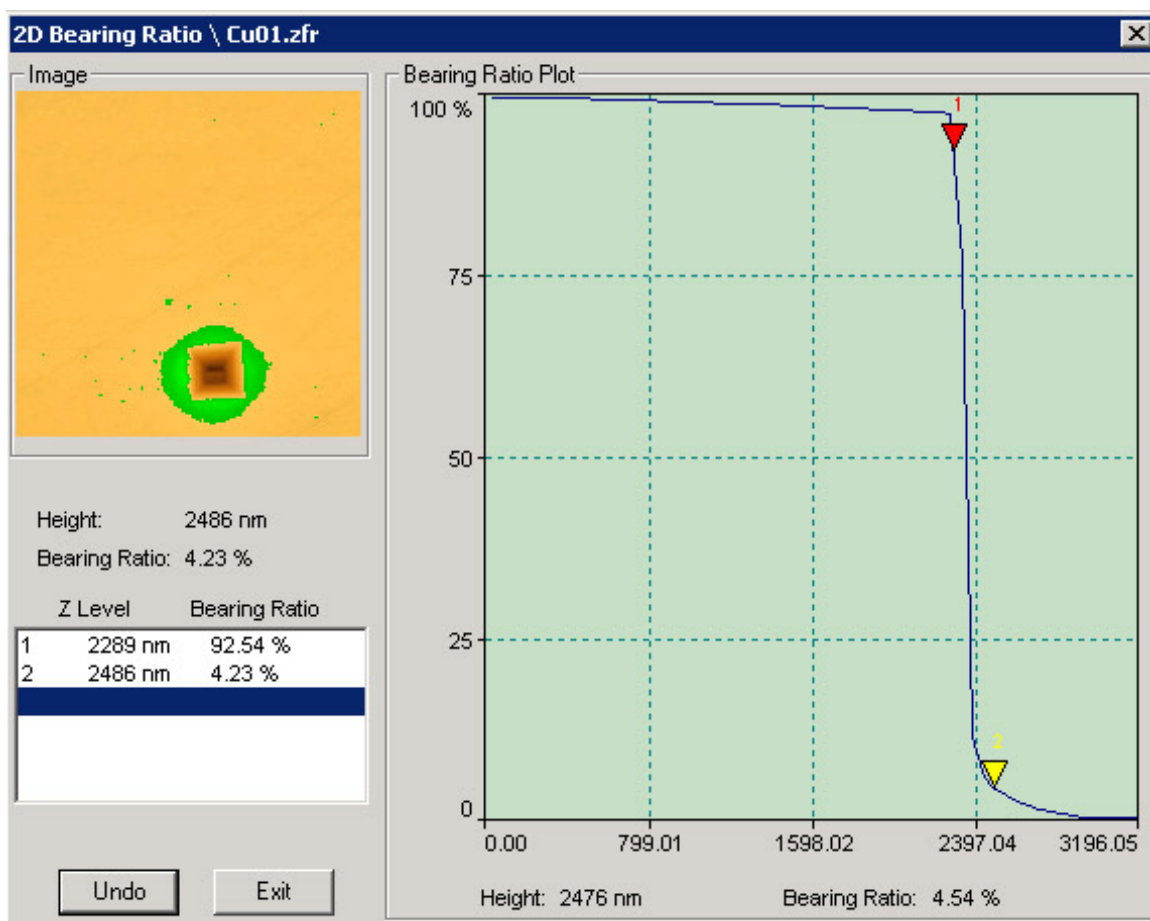
$$L = \alpha D' A^{D'/2}$$

$$D = D' + 1$$

Здесь α - константа, D' - фрактальная размерность береговой линии островков. Фрактальная размерность трехмерной поверхности (D) может быть вычислена из наклона $\text{Log}(L)\text{-Log}(A)$.

СТЕПЕНЬ ПОКРЫТИЯ (BEARING RATIO).

Выбор Анализ => Анализ площади => Степень покрытия (Analysis => Area Analysis => Bearing Ratio) вызывает панель Анализа степени покрытия.



Кривая степени покрытия (процентное соотношение данных на изображении выше выбранного Z уровня) показывается для всего изображения.

Для определения точки (степени покрытия в точке) на линии:

1. Нажмите левую кнопку мыши над окном кривой степени покрытия, при этом курсор превратится в линию.

2. Расположите линию в точке пересечения с кривой, в которой вы хотите вычислить степень покрытия. При перемещении линии вдоль кривой под окном кривой степени покрытия вы можете видеть текущие значения Z высоты и степени покрытия.

3. Нажмите левую кнопку мыши снова для задания точки. Степень покрытия, соответствующая этой точке, будет отображена в таблице. Площадь скана выше указанного Z уровня будет подсвечена на изображении.

4. Нажмите правую кнопку мыши для выхода из функции.

Нажатие на кнопку Отмена (Undo) для сброса выделенных точек и полученных результатов.

Определение степени покрытия. Двумерная степень покрытия является относительной частью поверхностной площади выше определенной Z плоскости и полной площадью поверхности изображения:

$$\text{степень покрытия} = \frac{(\text{площадь выше } Z \text{ уровня}) \cdot 100}{(\text{полная площадь})}$$

КРИТИЧЕСКИЙ РАЗМЕР (CRITICAL DIMENSION).

Функция измерения критических размеров позволяет анализировать средние размеры особенностей на изображении в соответствии с различными геометрическими моделями – среднее расстояние между параллельными линиями, средний радиус круга или участка кривой, средний угол (в X , Y плоскости) или средняя высота ступеньки.

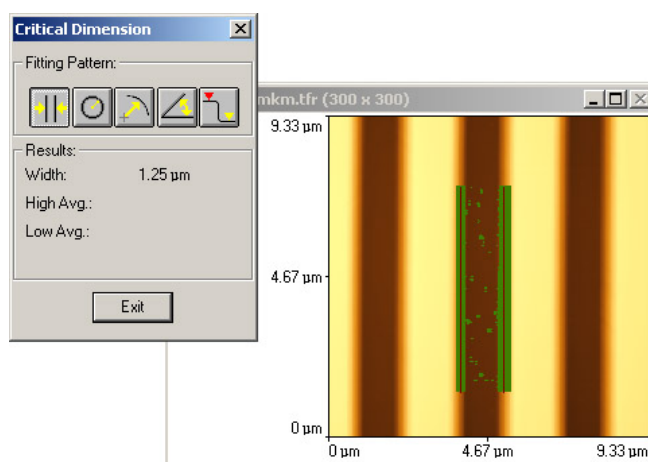
Расстояние между параллельными линиями.

1. Для активного изображения выберите Анализ => Критические размеры (Analysis => Critical Dimensions). Появится диалог выбора измеряемой величины.



2. Нажмите на кнопку

3. Разместите курсор мыши над изображением (при этом он превратится в перекрестие), нажмите левую кнопку и, не



отпуская ее, выделите прямоугольную область необходимого размера. Расположите выделенный прямоугольник вокруг деталей на изображении, содержащих параллельные линии.

4. Нажмите правую кнопку мыши.

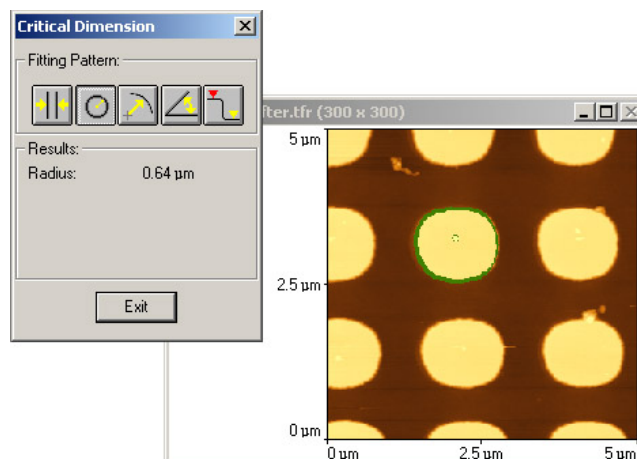
Параллельные области будут подсвечены зеленым цветом, две автоматически определенные линии показаны на изображении, а среднее расстояние между этими линиями будет отображено в окне результатов измерения.

Радиус круга.

1. Для активного изображения выберите Анализ => Критические размеры (Analysis =>Critical Dimensions). Появится диалог выбора измеряемой величины.



2. Нажмите на кнопку



3. Разместите курсор мыши над изображением (при этом он превратится в перекрестие), нажмите левую кнопку и, не

отпуская ее, выделите круг необходимого размера. Расположите выделенный круг над круглой особенностью на изображении.

4. Нажмите правую кнопку мыши.

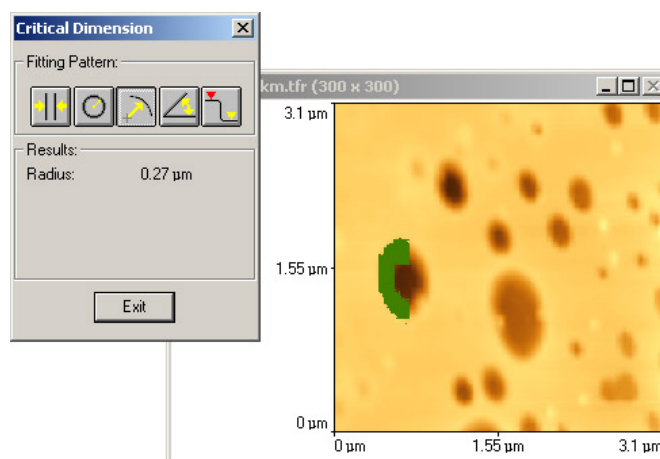
Автоматически определенная круглая область на изображении будет подсвечена зеленым цветом, а ее радиус будет отображен в окне результатов измерения.

Радиус участка кривой.

1. Для активного изображения выберите Анализ => Критические размеры (Analysis =>Critical Dimensions). Появится диалог выбора измеряемой величины.



2. Нажмите на кнопку



3. Разместите курсор мыши над изображением (при этом он превратится в перекрестие), нажмите левую кнопку и, не

отпуская ее, выделите прямоугольную область необходимого размера. Расположите выделенный прямоугольник так, чтобы он окружал хотя бы часть кривой.

4. Нажмите правую кнопку мыши.

Автоматически определенный участок кривой на изображении будет подсвечен зеленым цветом, а ее радиус будет отображен в окне результатов измерения.

Угол.

1. Для активного изображения выберите Анализ => Критические размеры (Analysis =>Critical Dimensions). Появится диалог выбора измеряемой величины.



2. Нажмите на кнопку

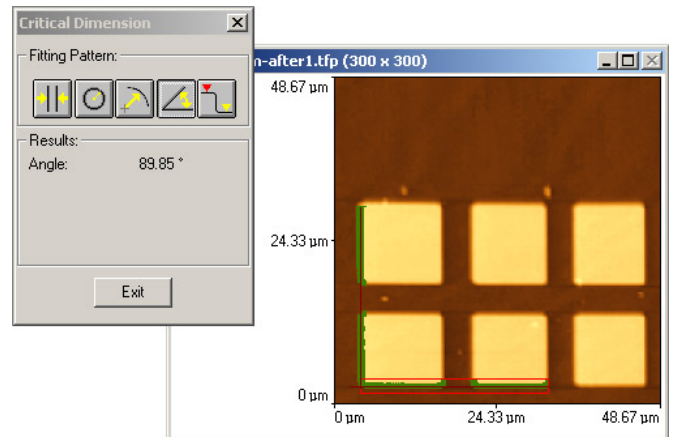
3. Разместите курсор мыши над изображением (при этом он превратится в перекрестие), нажмите левую кнопку и, не отпуская ее, выделите прямоугольную область необходимого размера. Расположите выделенный прямоугольник так, чтобы он окружал первую линию в измерении угла.

4. Нажмите правую кнопку мыши.

5. Разместите курсор мыши над изображением (при этом он превратится в перекрестие), нажмите левую кнопку и, не отпуская ее, выделите прямоугольную область необходимого размера. Расположите выделенный прямоугольник так, чтобы он окружал вторую линию в измерении угла.

4. Нажмите правую кнопку мыши.

Две области будут подсвечены зеленым цветом, две автоматически определенные линии в этих областях показаны на изображении, а угол между этими линиями будет отображен в окне результатов измерения.



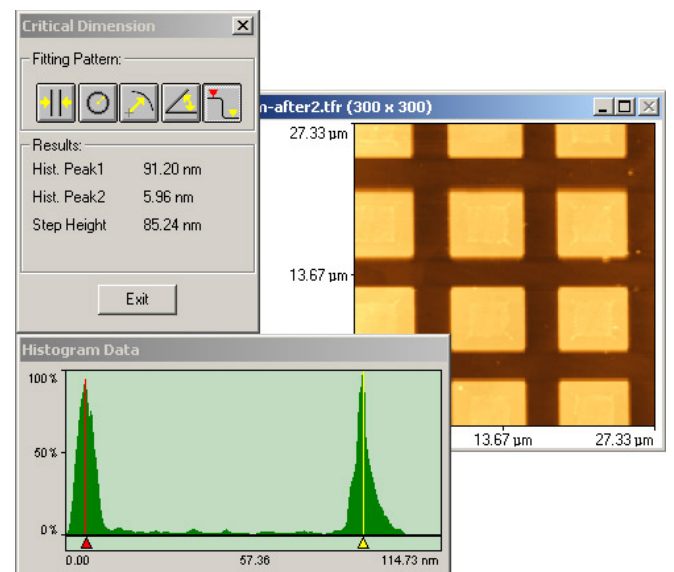
Высота ступеньки.

1. Для активного изображения выберите Анализ => Критические размеры (Analysis =>Critical Dimensions). Появится диалог выбора измеряемой величины.

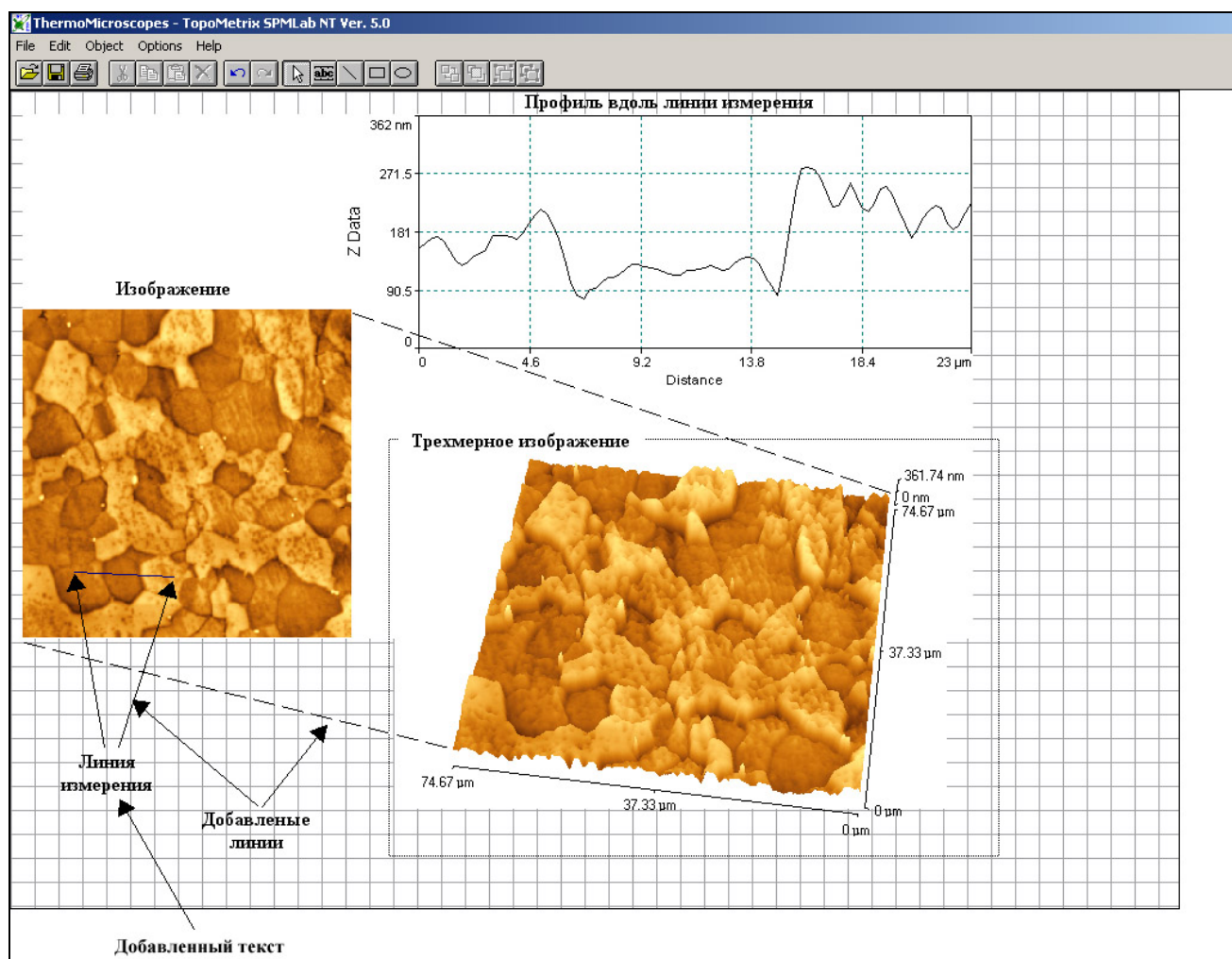


2. Нажмите на кнопку

Появится окно с гистограммой высот, автоматически определенные высоты первого и второго пиков, а также высота ступеньки будут отображены в окне результатов измерения.



МОДУЛЬ ЭКРАННОГО РЕДАКТОРА (SCREEN EDITOR)



Модуль Экранного редактора предназначен для визуального представления результатов эксперимента, сохранения их в графических форматах и распечатки на принтере. Он предоставляет возможность произвольного размещения на экране (листе бумаги) экспортированных в него данных (из модуля Анализа изображения), добавления текста, линий, стрелочек, рисунков (из ранее сохраненных графических файлов). У размещенных на экране рисунков и объектов может быть изменено положение и размер. Вы можете распечатать на принтере весь экран или какую-то его часть, а так же сохранить на жесткий диск компьютера в графическом формате (.jpg, .bmp, .wmf, .tif, .gif и др.) определенную часть экрана. Сохраненные на диске графические файлы могут быть затем открыты в Экранном редакторе или использованы в других программах.

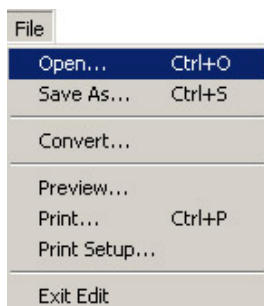
Edit Menu (Меню: редактирование).


Edit
Screen Edit... Ctrl+P
Data Edit...
Normalize Z


Находясь в модулях выполнения измерений (Data Acquisition) или анализа изображений (Image Analysis) вы можете перейти в модуль Экранного редактора, выбрав в меню Редактирование => Экранный редактор (Screen Edit...)[†]. При этом на странице Экранного редактора появятся элементы, открытые в том модуле, из которого вы переходите в Экранный редактор.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ИНТЕРФЕЙСА МОДУЛЯ ЭКРАННОГО РЕДАКТОРА

File Menu (Меню: файл).




Файл => Открыть... (File Open...) Вызывает окно диспетчера файлов, в котором отображаются все поддерживаемые программой графические файлы. Эта функция также становится доступной при нажатии кнопки  в рабочей панели.

Файл => Сохранить как... (Save As...) Вызывает окно сохранения данных, которое позволяет сохранить текущий экран или какую-то выделенную его часть в графическом формате (.jpg, .bmp, .wmf, .tif, .gif и др.). Эта функция также становится доступной при нажатии кнопки  в рабочей панели.

Файл => Конвертировать... (Convert...) Вызывает окно конвертирования, которое позволяет конвертировать файлы поддерживаемых графических форматов из одного типа в другой.

Файл => Предварительный просмотр... (Preview...) Вызывает окно предварительного просмотра – страницу, на которой будут размещены изображения так, как они впоследствии будут выведены на печать.

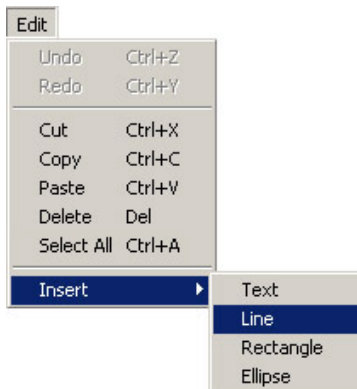
Файл => Печать... (Print...) Вызывает окно выбора принтера или отправляет текущую страницу на печать (если установлен один принтер). Эта функция также становится доступной при нажатии кнопки  в рабочей панели.

Файл => Настройка печати... (Print Setup...) Вызывает окно настройки параметров печати, в котором может быть выбран принтер, ориентация страницы, параметры бумаги и т.д.

[†] Для использования модуля Экранного редактора к компьютер должен быть подключен принтер. При отсутствии принтера, на компьютере достаточно установить драйвера стандартного принтера.

Файл => Выход из редактора (Exit Edit) Возвращает вас в модуль, из которого вы перешли в Экранный редактор.

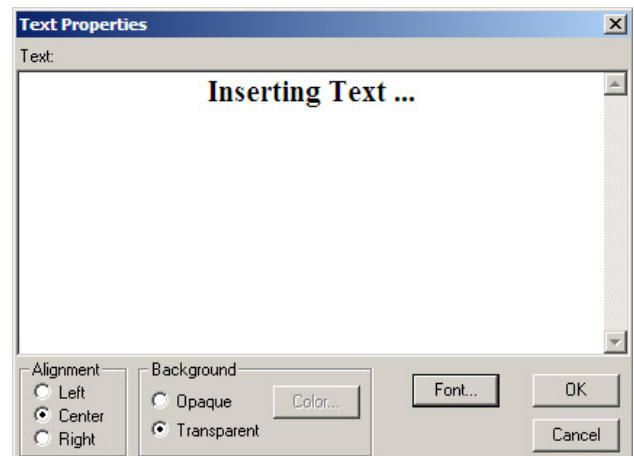
Edit Menu (Меню: редактирование).



Большинство команд меню Редактирования не требуют подробных пояснений и ясны из их названий: команда UnDo отменяет последнюю выполненную операцию, ReDo возвращает экран к состоянию, до применения команды UnDo, команда Cut вырезает выделенные на экране объекты и копирует их в буфер, команда Copy копирует их в буфер, команда Paste вставляет на экран объекты из буфера, команда Delete удаляет выделенные на экране объекты. Все эти команды дублируются кнопками в рабочей панели.

Редактирование => Выделить все (Select All) Выделяет все объекты на экране. Если все объекты выделены, то этот пункт меню изменяется на Deselect All..., при выборе которого снимается выделение со всех объектов.

Редактирование => Вставить (Insert) => Текст (Text). Разместите курсор мыши над свободным местом на экране, нажмите левую кнопку и, не отпуская ее, выделите область произвольного размера. Отпустите левую кнопку мыши. При этом появится окно создания текстового поля. После заполнения поля Text, нажав на кнопку Font..., вы можете задать параметры текста (шрифт, начертание, размер, цвет), опреде-




лить параметры выравнивания текста, задать цвет фона текстовой области. После нажатия на кнопку Ok, текстовое поле появится на листе Экранного редактора. Двойной щелчок левой кнопкой мыши на ранее созданном текстовом поле позволяет войти в окно редактирования

текста. Эта функция также становится доступной при нажатии кнопки  в рабочей панели.

=> Линию (Line). Разместите курсор мыши над свободным местом на экране, нажмите левую кнопку и, не отпуская ее, переместите курсор на определенное расстояние. При этом на листе



Экранного редактора появится линия. Отпустите левую кнопку мыши, зафиксировав ее длину.

Эта функция также становится доступной при нажатии кнопки  в рабочей панели. Двойной щелчок левой кнопкой мыши на ранее созданной линии позволяет войти в окно свойств линии, в котором могут быть заданы стиль, толщина, цвет линии, а так же наличие у нее стрелочек с обеих сторон.

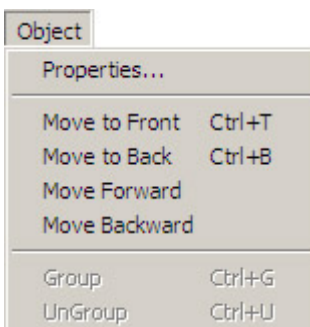
=> Прямоугольник (Rectangle).

=> Эллипс (Ellipse).

Разместите курсор мыши над свободным местом на экране, нажмите левую кнопку и, не отпуская ее, выделите область необходимого размера. Отпустите левую кнопку мыши. При этом на листе Экранного редактора появится прямоугольник или эллипс выделенного размера.



Эта функция также становится доступной при нажатии кнопок  или  в рабочей панели. Двойной щелчок левой кнопкой мыши на ранее созданном прямоугольнике или эллипсе позволяет войти в окно свойств этого объекта, в котором могут быть заданы стиль, толщина, цвет контура, а так же цвет фона.

Object Menu (Меню: объект).

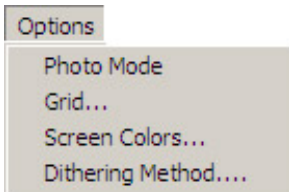


Объект => Свойства... (Properties...) Если на странице Экранного редактора выделены какие-либо объекты, например, изображение, текстовая область или линия, выбрав этот пункт меню, вы откроете окно свойств соответствующего объекта.

Действие команд Move to Front (Переместить на передний план), Move to Back (Переместить на задний план), Move Forward (Переместить вперед) и Move Backward (Переместить назад) ясно из их названий. Эти команды дублируются кнопками в рабочей панели.

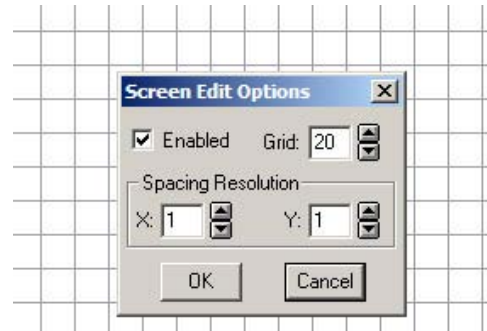
Команда Group (Группировать) позволяют сгруппировать несколько выделенных объектов в один, а команда Ungroup (Разгруппировать) разгруппировывает выделенную группу объектов. Эти функции также становятся доступными при нажатии кнопок  и  в рабочей панели.

Options Menu (Меню: опции).

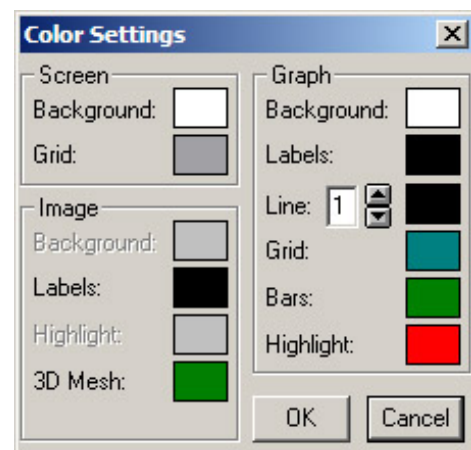


Опции => Режим фото (Photo Mode) При выборе этой функции на листе Экранного редактора скрываются панель меню, рабочая панель, а так же полосы прокрутки. Этот режим удобен когда необходимо сделать захват экрана без посторонней информации. Для возврата к стандартному режиму щелкните левой кнопкой мыши на экране.

Опции => Сетка... (Grid...) Появляется окно свойств экранного редактора, в котором может быть включено/отключено отображение сетки на экране, а так же заданы параметры сетки.



Опции => Цвета экрана... (Screen Colors...) Появляется окно настроек цветов, в котором могут быть заданы цветовые настройки для различных объектов в Экранном редакторе – самого экрана, изображений и графиков.



Александр Валерьевич **Круглов**

**ОБРАБОТКА, ЧИСЛЕННАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ
СЗМ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ
РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА
/На основе программного пакета SPMLab/**

Учебное пособие

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И.
Лобачевского».
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Подписано в печать .2010. Формат 60х84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл.печ.л. 3,2 . Уч.-изд.л. .
Заказ № . Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии Нижегородского госуниверситета
им. Н.И. Лобачевского
603600, г. Нижний Новгород, ул. Большая Покровская, 37
Лицензия ПД № 18-0099 от 14.05.01