

Обработка экспериментальных данных

Искажения и артефакты

Искажения:

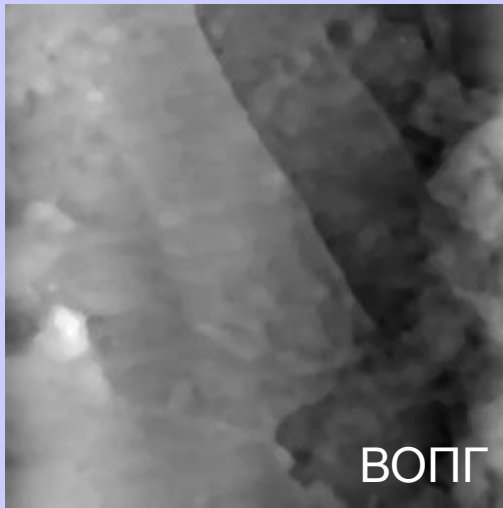
- точечные – выбросы, шумы;
- линейные - сдвиги линий сканирования по высоте, «двойниковые» строки сканирования;
- двумерные – псевдообъекты, искажения формы ступенек, интерференционные искажения, «двойниковые» изображения;
- обработочные – при проведении некорректных процедур математической обработки изображения.

Артефакты:

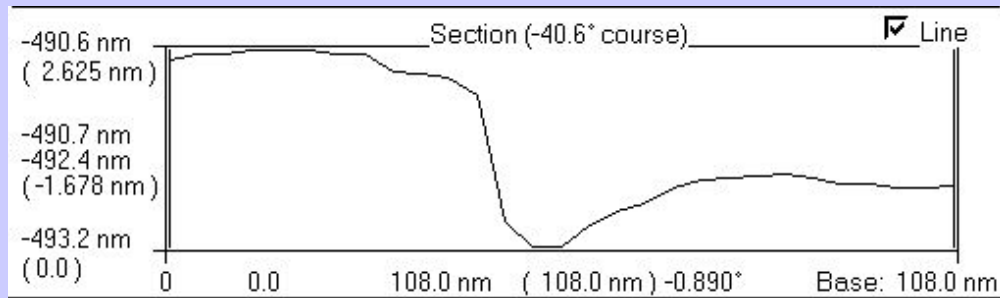
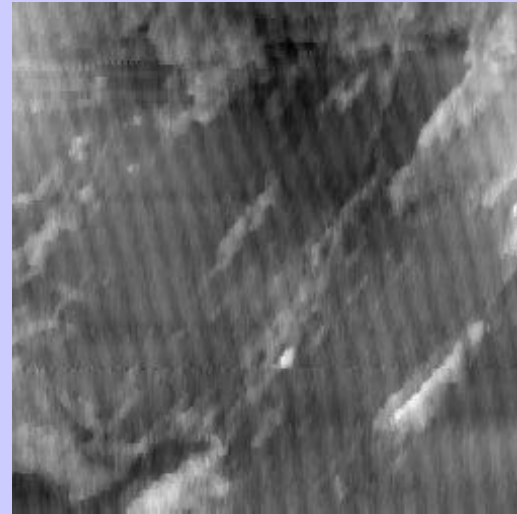
- графит - на СТМ-изображении виден лишь каждый второй атом на поверхности, т.е. вместо гексагонов – треугольники;
- изображение иглы (если игла «более плоская», чем особенности на поверхности образца);
- увеличение размеров объектов при «обрастании» иглы;
- зависимость вида изображения от значения туннельного напряжения (для образцов с неоднородной проводимостью поверхности и полупроводников).

Искажения

Искажение формы ступеньки



Интерференционные искажения



Математическая обработка изображения

Задачи:

- **улучшение качества изображения** (снижение уровня шумов, устранение сбоев ступенок, “восстановление” изображения);
- **анализ полученных данных** (отделение периодической информации от непериодической, измерение расстояний, параметров шероховатости и т.д.);
- **представление результатов** (выделение объектов, 3-х мерное изображение, цветовая палитра и т.д).

Полезная литература:

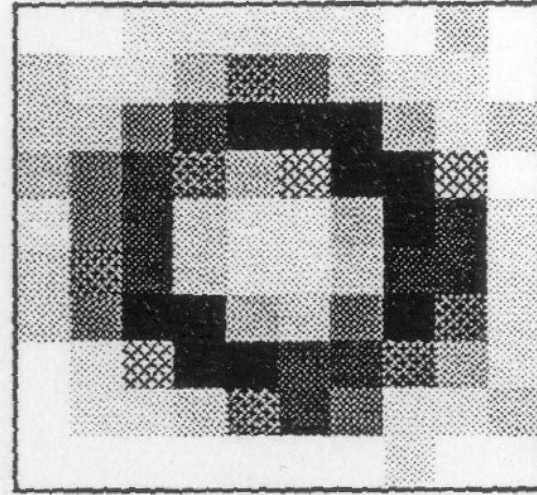
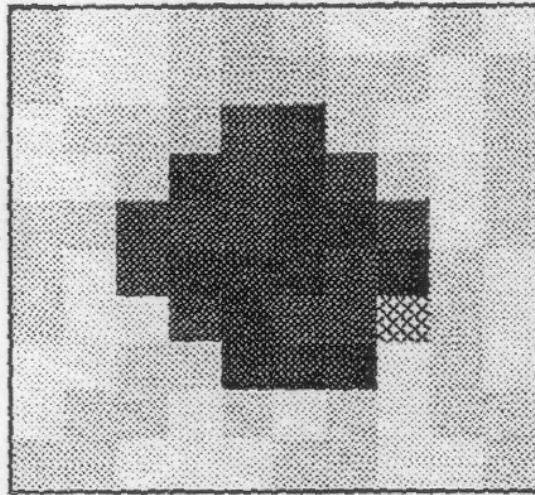
1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии.-М:Техносфера,2004.144с.
2. Russ J.C. Computer – assisted microscopy: the measurement and analysis of images. - New York: Plenum Press, 1990. - 451 p.
3. Розенфельд А. Распознавание и обработка изображений с помощью вычислительных машин. М.: Мир, 1972, - 231 с.
4. Сканирующая зондовая микроскопия биополимеров. Под редакцией Яминского И.В. М.: Научный мир, 1997. – 86 с.
5. Учебное пособие по микроскопу СММ-2000, «Шаг за шагом» до получения кадров в СТМ и АСМ. М.: 2005. - 64 с.
6. **Help (программа ScanMaster – Professional scanning & analysis program for SPM).**

Математическая обработка изображения

Пиксельное изображение

```
3 2 2 3 4 3 2 2 3 2
3 2 2 3 4 4 3 3 2 3
2 3 3 4 7 8 3 2 2 3
2 2 3 8 7 8 7 3 2 3
3 3 7 7 7 8 8 7 2 3
3 2 7 8 8 8 7 8 3 2
3 2 2 7 8 7 7 5 3 2
2 2 3 3 8 8 7 2 3 2
2 3 3 2 3 2 3 2 3 3
3 3 2 2 2 3 3 2 2 3
```

```
0 0 1 1 1 1 1 0 2 0
2 1 1 3 6 5 2 1 1 0
2 2 5 8 9 9 9 3 1 2
3 5 8 6 3 4 9 9 4 0
1 5 7 2 1 1 3 9 8 1
2 6 7 2 1 1 2 8 8 1
2 5 9 9 3 2 5 9 6 1
0 1 4 9 9 7 8 6 3 1
0 1 1 2 6 8 5 1 1 2
0 0 0 0 0 0 0 1 0 0
```



Математическая обработка изображения.

Subplane (fine) * - **устранение общего наклона изображения:** устранение наклона в кадре осуществляется путем вычитания из высот кадра в каждой точке X, Y высот уравнения плоскости $Z = a \times X + b \times Y + c$. Коэффициенты a, b и c в уравнении определяются методом наименьших квадратов из требования минимального отклонения от плоскости всех точек кадра.

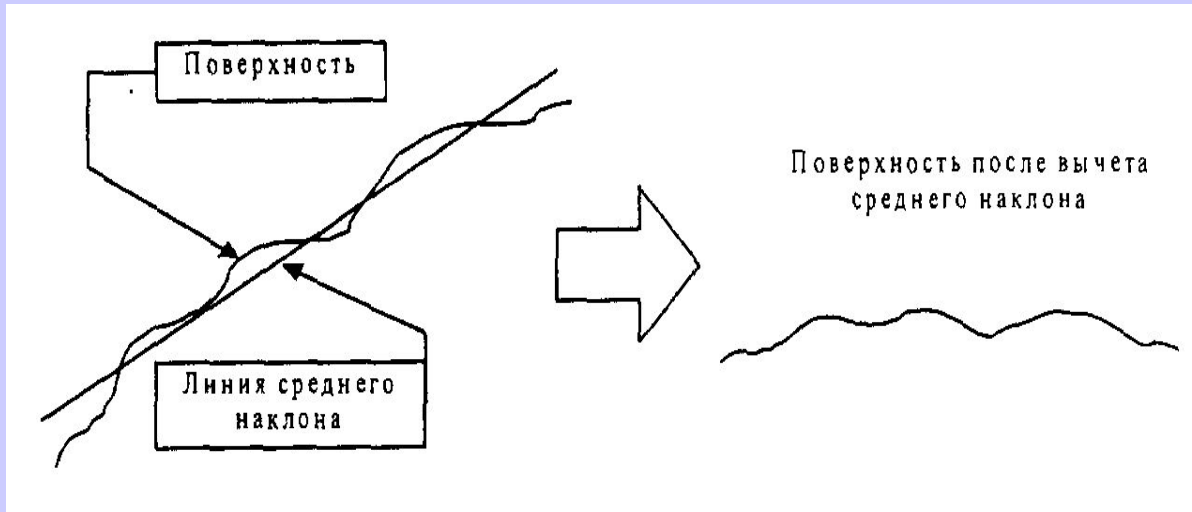
Step correction – операция корректирует сбой микроскопа типа «ступенька», проявляющихся в том, что в результате сбоя электроники две соседние строки сканирования могут значительно различаться по высоте: сначала вычисляется средняя высота (среднее Z) всего кадра. Далее кадр обрабатывается построчно. Каждая горизонтальная строка кадра (по X) сдвигается по Z (по высоте) так, чтобы средняя высота строки была равна средней высоте кадра.

Median 2D – **медианная фильтрация используется для подавления случайных шумов:** медианная фильтрация осуществляется следующим образом. Составляется список значений высоты (или яркости) точки и ее соседей согласно выбранному ядру (например, ядро 3×3 – точка и ее ближайшие соседи: 4 – ортогональных, 4 – диагональных). Список высот сортируется в порядке возрастания. В качестве нового значения высоты данной точки кадра из списка выбирается та высота, номер которой в отсортированном списке ближе всего к номеру, определяемому условием: $n = (N_x \times N_y - 1) \times (\text{level} / 100)$, где N_x, N_y – размерность матрицы по x, y соответственно, level – уровень медианной фильтрации в % (задается пользователем, по умолчанию – 50).

* названия, принятые в программе Scan Master.

Математическая обработка изображения.

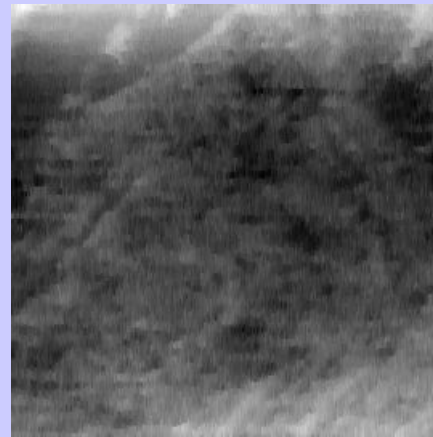
Вычитание среднего наклона



До процедуры



После процедуры



Математическая обработка изображения.

Subplane (fine) * - **устранение общего наклона изображения:** устранение наклона в кадре осуществляется путем вычитания из высот кадра в каждой точке X, Y высот уравнения плоскости $Z = a \times X + b \times Y + c$. Коэффициенты a, b и c в уравнении определяются методом наименьших квадратов из требования минимального отклонения от плоскости всех точек кадра.

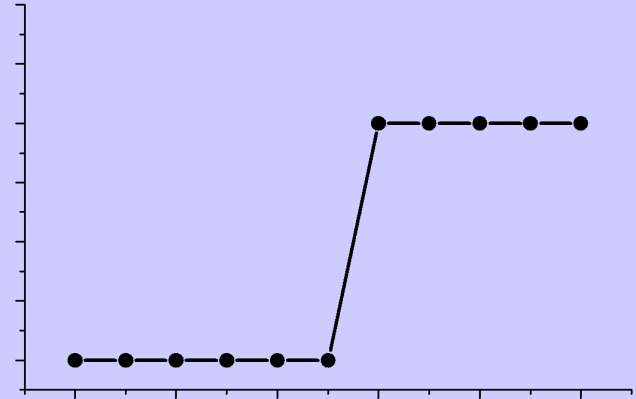
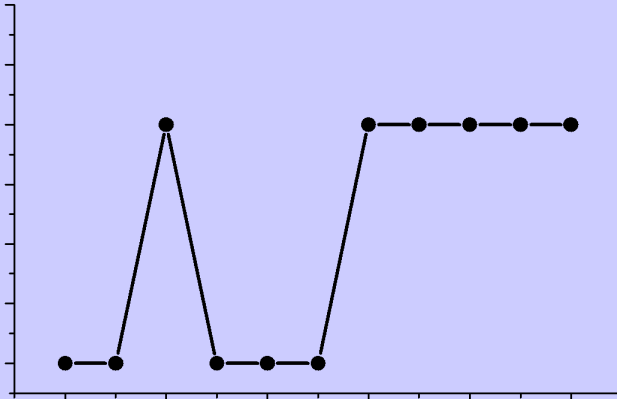
Step correction – операция корректирует сбои микроскопа типа «ступенька», проявляющихся в том, что в результате сбоя электроники две соседние строки сканирования могут значительно различаться по высоте: сначала вычисляется средняя высота (среднее Z) всего кадра. Далее кадр обрабатывается построчно. Каждая горизонтальная строка кадра (по X) сдвигается по Z (по высоте) так, чтобы средняя высота строки была равна средней высоте кадра.

Median 2D – **медианная фильтрация используется для подавления случайных шумов:** медианная фильтрация осуществляется следующим образом. Составляется список значений высоты (или яркости) точки и ее соседей согласно выбранному ядру (например, ядро 3×3 – точка и ее ближайшие соседи: 4 – ортогональных, 4 – диагональных). Список высот сортируется в порядке возрастания. В качестве нового значения высоты данной точки кадра из списка выбирается та высота, номер которой в отсортированном списке ближе всего к номеру, определяемому условием: $n = (N_x \times N_y - 1) \times (\text{level} / 100)$, где N_x, N_y – размерность матрицы по x, y соответственно, level – уровень медианной фильтрации в % (задается пользователем, по умолчанию – 50).

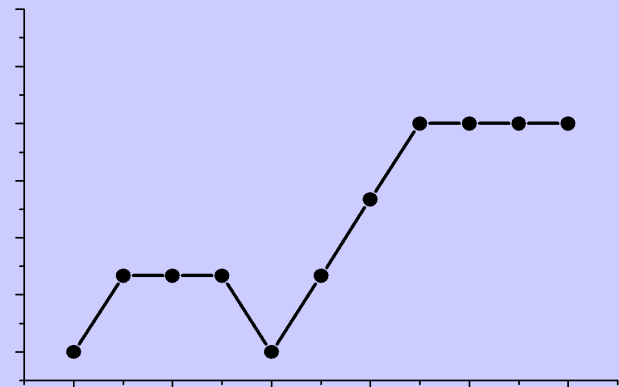
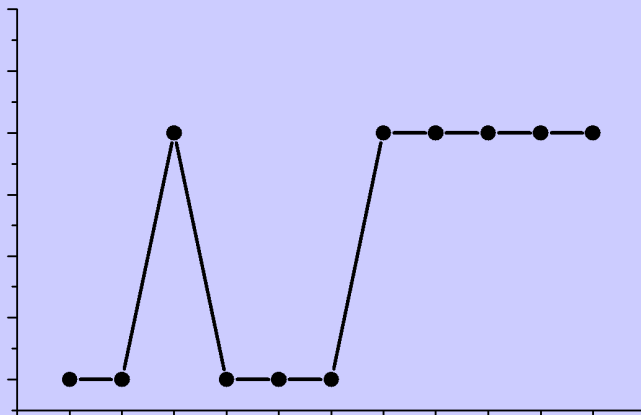
* названия, принятые в программе Scan Master.

Математическая обработка изображения.

Медианная фильтрация



Усреднение



Математическая обработка изображения

Частотная область. Фурье фильтрация.

Фурье преобразование - кодирует информацию изображения в терминах частот в прототипе.

Для изображения, представленного в виде двумерной матрицы значений яркости $f(x,y)$, преобразование рассчитывается в виде:

$$F(u,v) = \iint f(x,y) \exp[-2\pi i(ux - vy)] dx dy .$$

Переменные u и v - частоты.

В частотной области операция действия фильтра:

$$G(u,v) = H(u,v) * F(u,v),$$

где F , H и G - частотное преобразование, ядро и результат.

Производное изображение затем восстанавливается методом обратного преобразования.

Математическая обработка изображения

Фурье фильтрация

Приложение Scan Master использует для фильтрации фурье-образа фильтры

Баттерворта 1-ого, 2-ого, 4-ого или 8-ого порядка.

Фильтрация проводится путем умножения Re и Im амплитуд фурье-образа на передаточную функцию фильтра:

$$\text{new Im}(fx, fy) = K(fx, fy) * [\text{old Im}(fx, fy)], \text{new Re}(fx, fy) = K(fx, fy) * [\text{old Re}(fx, fy)]$$

где $K(fx, fy)$ - передаточная функция фильтра; fx, fy - частоты.

Передаточные функции являются вещественными.

n - порядок фильтра; $f02$ - квадрат частоты среза фильтра, т.е. частоты, на которой подавление фильтра равно 3 dB; $(f0x, f0y)$ - центр полосы пропускания или подавления полосового фильтра или параметры фильтров осей x, y .

Передаточные функции используемых приложением фильтров

НЧ-фильтр: $K1(fx, fy) = 1 / \{1 + 0.414 * [((fx * fx + fy * fy) / f02) ** n]\}$

ВЧ-фильтр: $K2(fx, fy) = 1 / \{1 + 0.414 * [(f02 / (fx * fx + fy * fy)) ** n]\}$

Режекторный (полосовой подавляющий) фильтр:

$$K3(fx, fy) = 1 / \{1 + 0.414 * [f02 / ((fx - fx0) ** 2 + (fy - fy0) ** 2)] ** n\} + 1 / \{1 + 0.414 * [f02 / ((fx + fx0) ** 2 + (fy + fy0) ** 2)] ** n\}$$

Полосовой пропускающий фильтр:

$$K4(fx, fy) = 1 / \{1 + 0.414 * [((fx - fx0) ** 2 + (fy - fy0) ** 2) / f02] ** n\} + 1 / \{1 + 0.414 * [((fx + fx0) ** 2 + (fy + fy0) ** 2) / f02] ** n\}$$

НЧ-фильтр с подчеркиванием: $K5(fx, fy) = K1(fx, fy) + 1$

ВЧ-фильтр с подчеркиванием: $K6(fx, fy) = K2(fx, fy) + 1$

Полосовой пропускающий фильтр с подчеркиванием: $K7(fx, fy) = K4(fx, fy) + 1$

Вырезание окрестности оси X: if $fx0 < fy0$ or $\text{abs}(fx) > fx0$ $K8(fx, fy) = 1 / \{1 + 0.414 * (fy0 / fy) ** (2n)\}$ else $K8(fx, fy) = K3(fx, fy)$.

В выражении для $K3$ следует последовательно заменить $fy0$ на 0, $f02$ на $fy0 ** 2$.

Вырезание окрестности оси Y: if $fx0 > fy0$ or $\text{abs}(fy) > fy0$ $K9(fx, fy) = 1 / \{1 + 0.414 * (fx0 / fx) ** (2n)\}$ else $K8(fx, fy) = K3(fx, fy)$

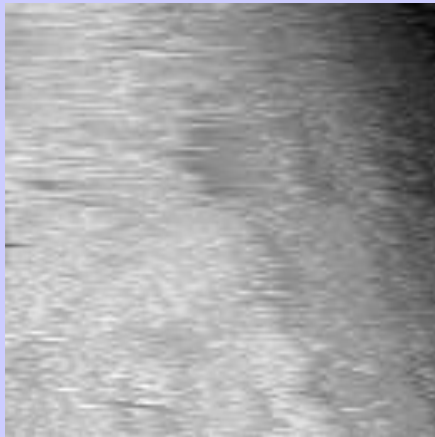
В выражении для $K3$ следует последовательно заменить $fx0$ на 0, $f02$ на $fx0 ** 2$.

Нормализация фурье-образа после фильтрации с подчеркиванием $K10(fx, fy) = 1/2$

Математическая обработка изображения. Процедуры, полезные при обработке СТМ - изображений

Фурье фильтрация

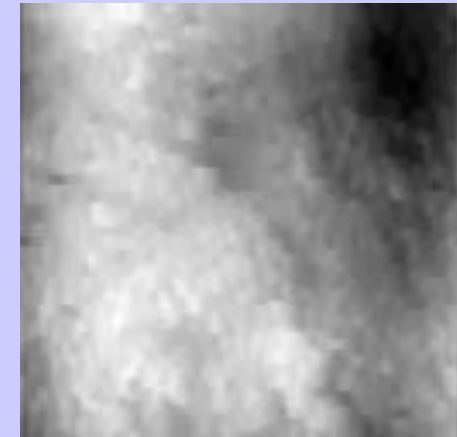
Исходное
изображение



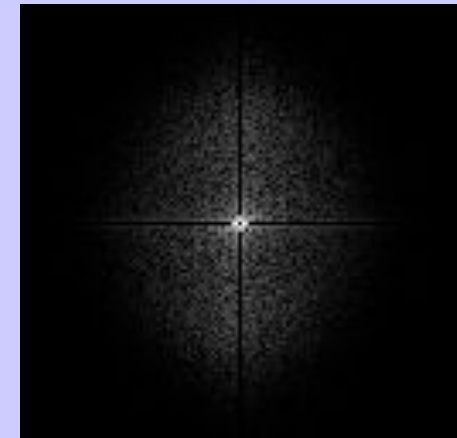
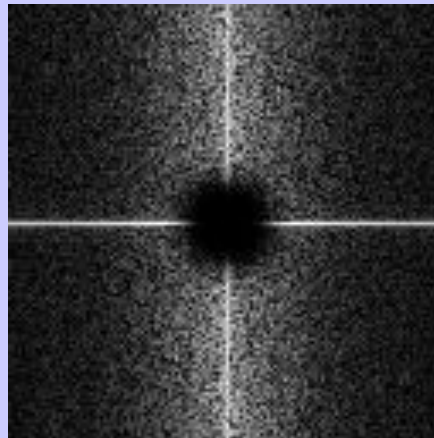
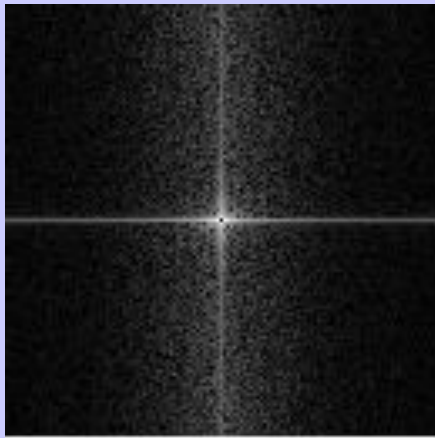
Использован
High Pass Filter



Использован
Low Pass Filter и X,Y axis Filter

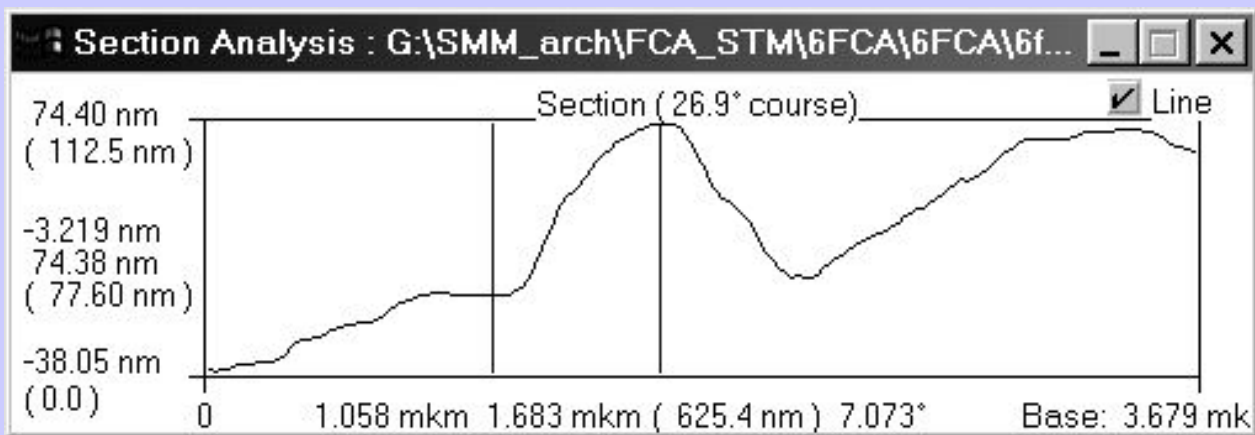


Фурье образ



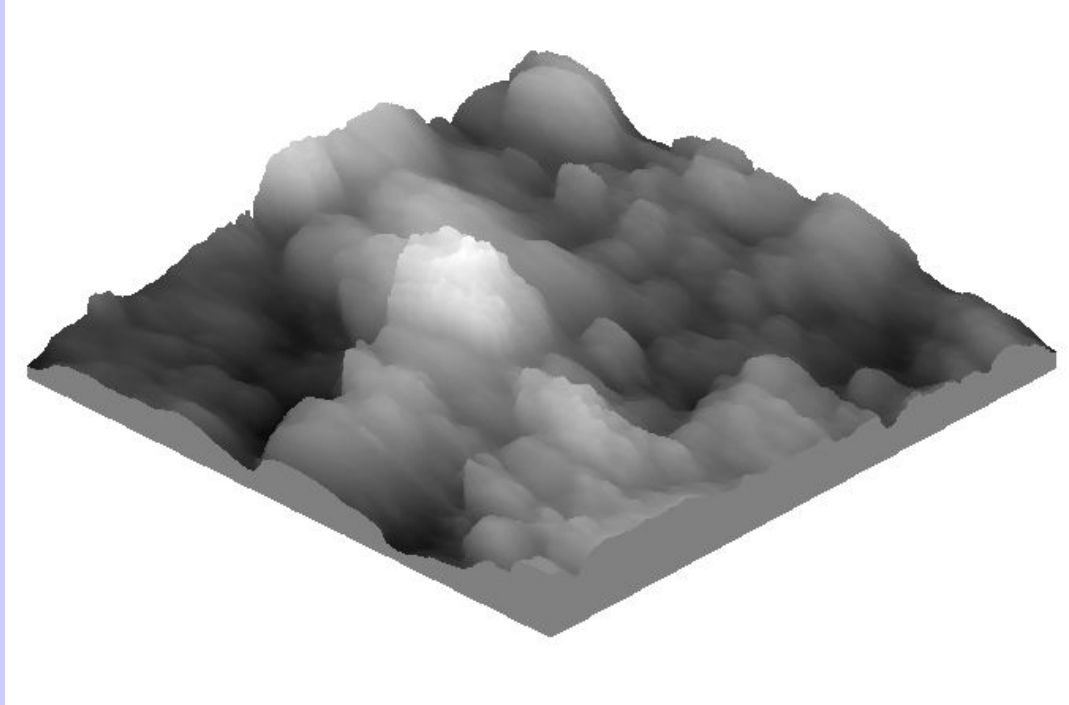
Математическая обработка изображения.

Построение профиля (Measure | Scan Section)

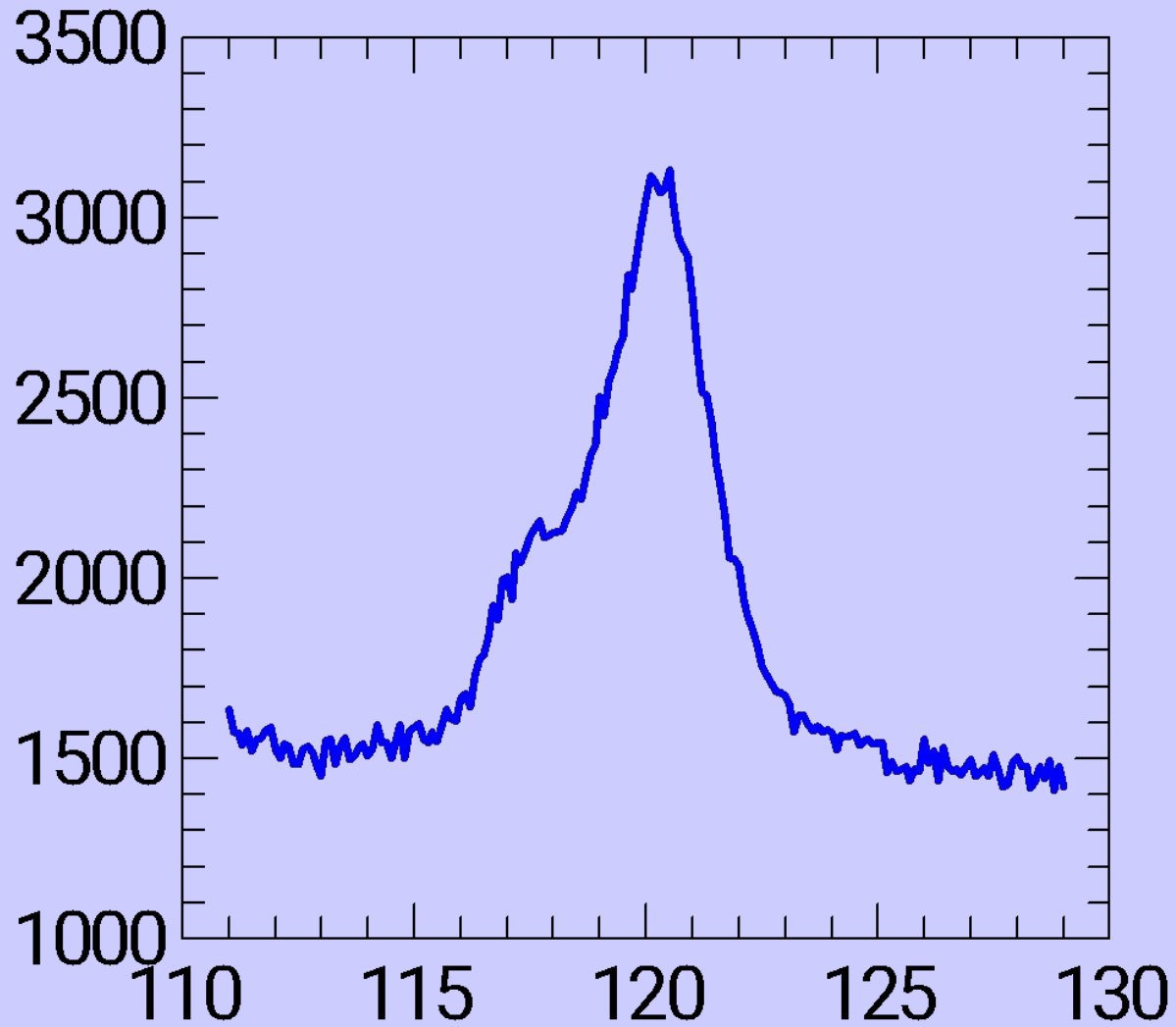


Математическая обработка изображения.

Построение 3D - изображения



Спектр РФЭС



Углерод, 1s