



# Обработка экспериментальных данных

# Искажения и артефакты

## Искажения:

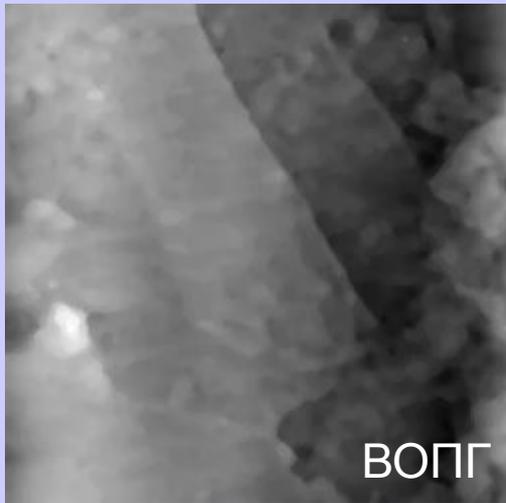
- точечные – выбросы, шумы;
- линейные - сдвиги линий сканирования по высоте, «двойниковые» строки сканирования;
- двумерные – псевдообъекты, искажения формы ступенек, интерференционные искажения, «двойниковые» изображения;
- обработочные – при проведении некорректных процедур математической обработки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

## Артефакты:

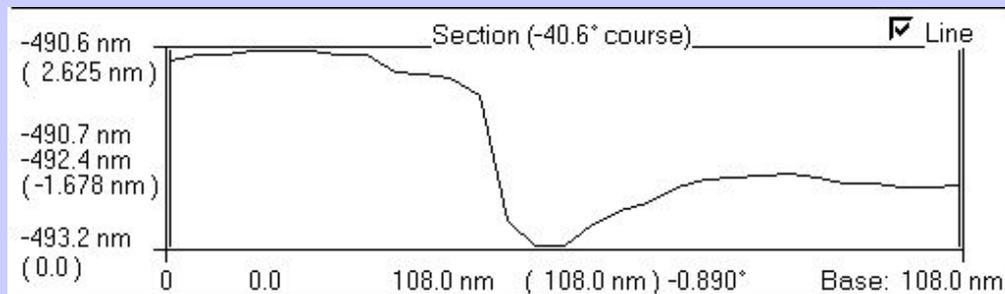
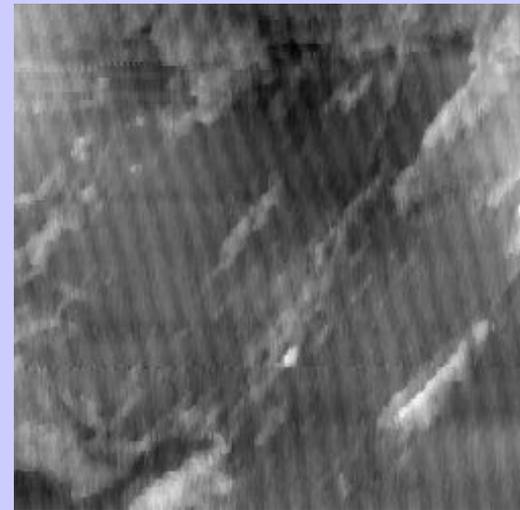
- графит - на СТМ-изображении виден лишь каждый второй атом на поверхности, т.е. вместо гексагонов – треугольники;
- изображение иглы (если игла «более плоская», чем особенности на поверхности образца);
- увеличение размеров объектов при «обрастании» иглы;
- зависимость вида изображения от значения туннельного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

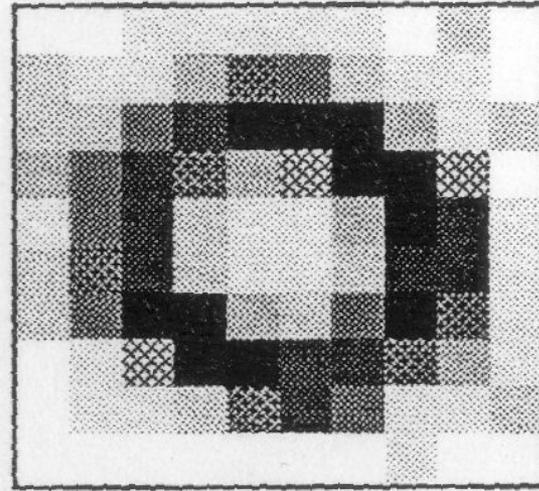
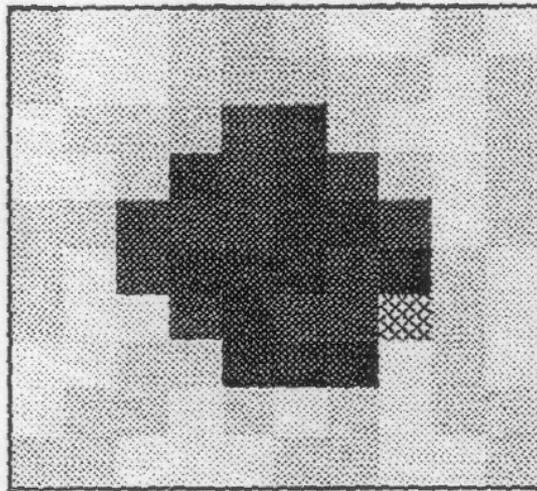
1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии.-М:Техносфера,2004.144с.
2. Russ J.C. Computer – assisted microscopy: the measurement and analysis of images. - New York: Plenum Press, 1990. - 451 p.
3. Розенфельд А. Распознавание и обработка изображений с помощью вычислительных машин. М.: Мир, 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.

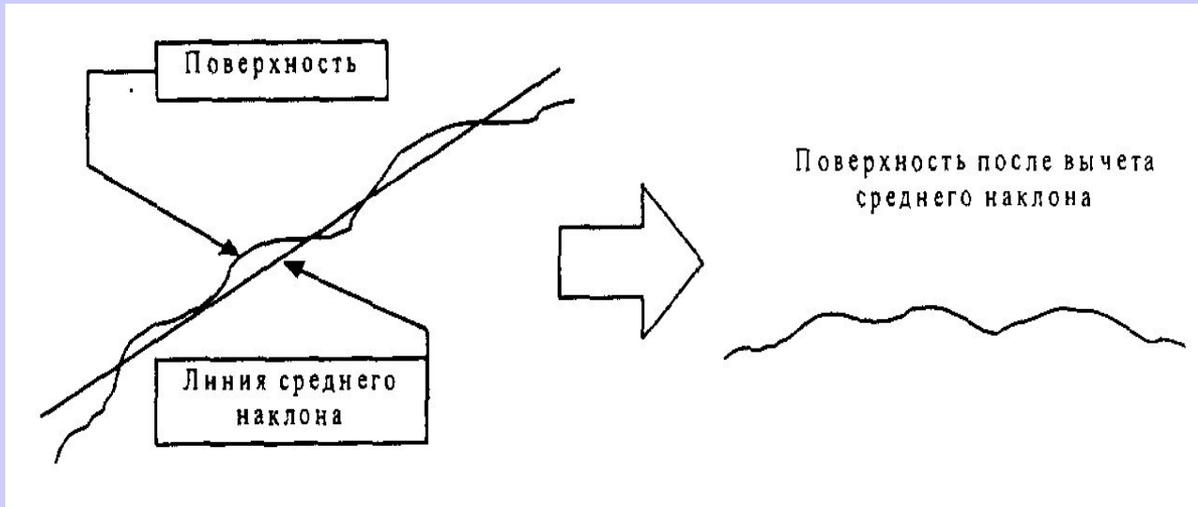
**Step correction** – операция корректирует сбой микроскопа типа «ступенька», проявляющихся в том, что в результате сбоя электроники две соседние строки сканирования могут значительно различаться по высоте: сначала вычисляется средняя высота (среднее  $Z$ ) всего кадра. Далее кадр обрабатывается построчно. 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  $3 \times 3$  – 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,  $\text{level}$  – уровень медианной фильтрации в % (задается пользователем, по умолчанию – 50).

\* названия, принятые в программе Scan Master.

# Математическая обработка изображения.

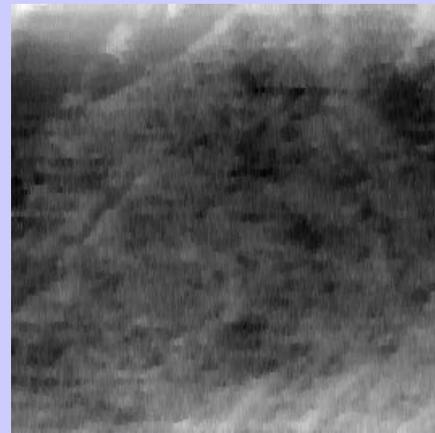
## Вычитание среднего наклона



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.

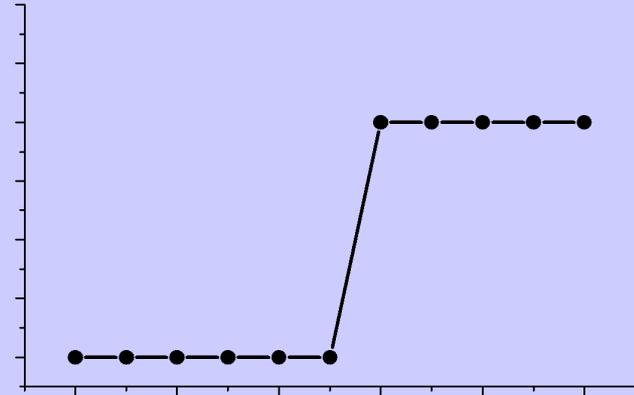
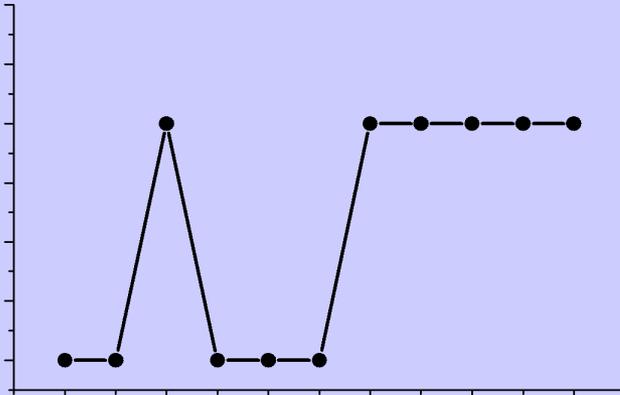
**Step correction** – операция корректирует сбои микроскопа типа «ступенька», проявляющихся в том, что в результате сбоя электроники две соседние строки сканирования могут значительно различаться по высоте: сначала вычисляется средняя высота (среднее  $Z$ ) всего кадра. Далее кадр обрабатывается построчно. 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  $3 \times 3$  – 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,  $\text{level}$  – уровень медианной фильтрации в % (задается пользователем, по умолчанию – 50).

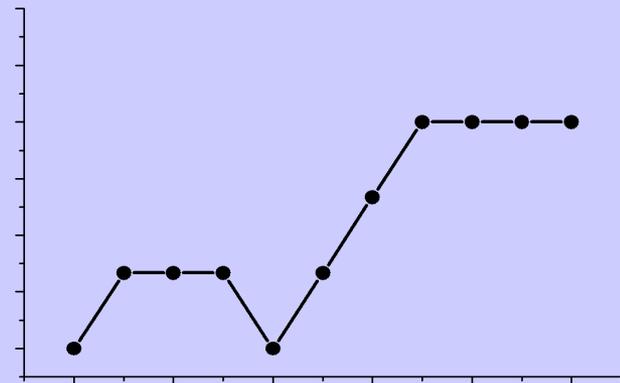
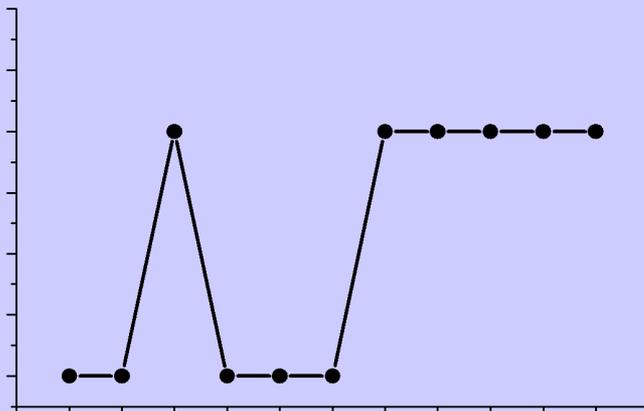
\* названия, принятые в программе Scan Master.

# 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  $K8(fx, fy) = K3(fx, fy)$

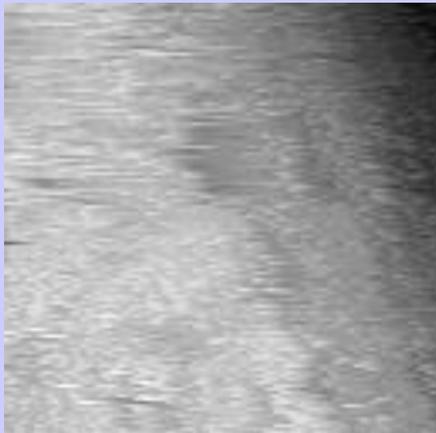
В выражении для  $K3$  следует последовательно заменить  $fx0$  на 0,  $f02$  на  $fx0^{**2}$ .

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

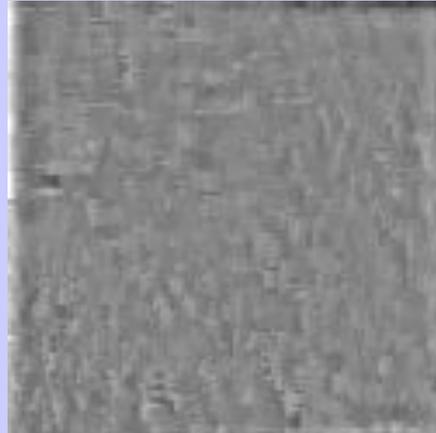
# Математическая обработка изображения. Процедуры, полезные при обработке СТМ - изображений

## Фурье фильтрация

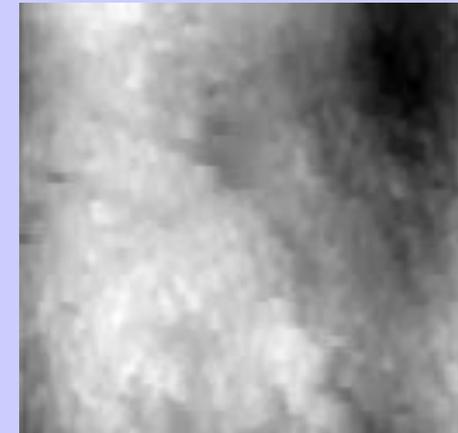
Исходное  
изображение



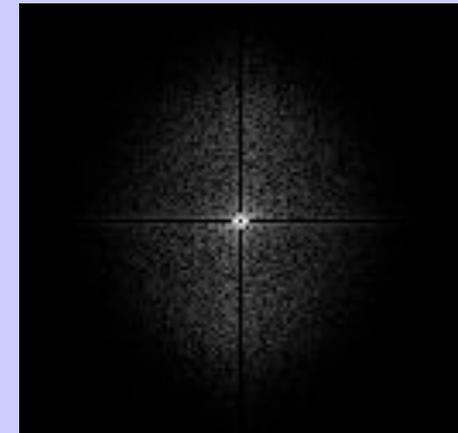
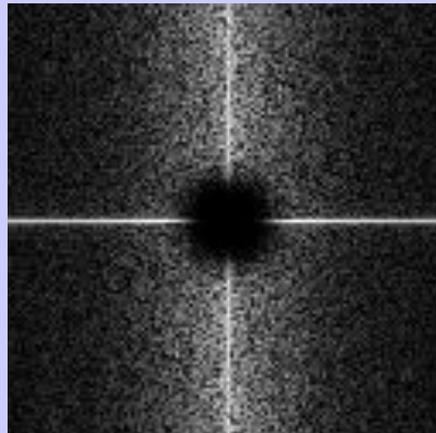
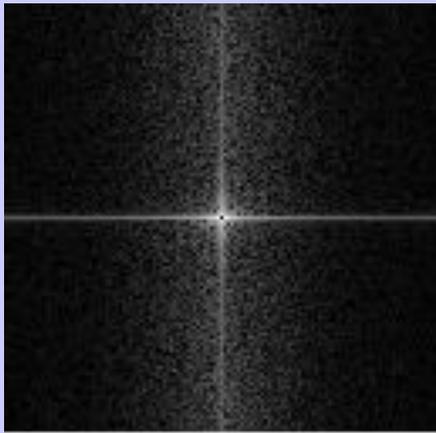
Использован  
High Pass Filter



Использован  
Low Pass Filter и X,Y axis Filter

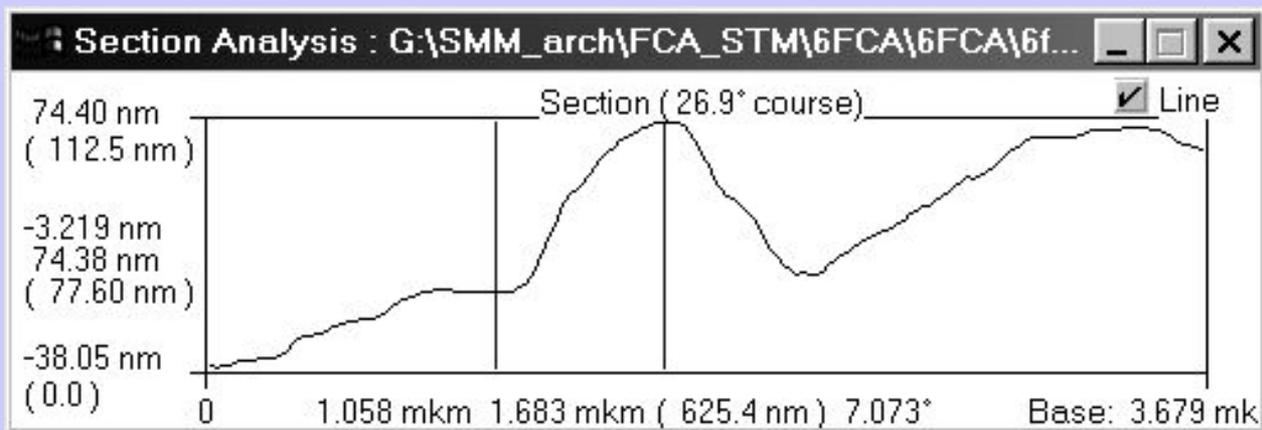


Фурье образ



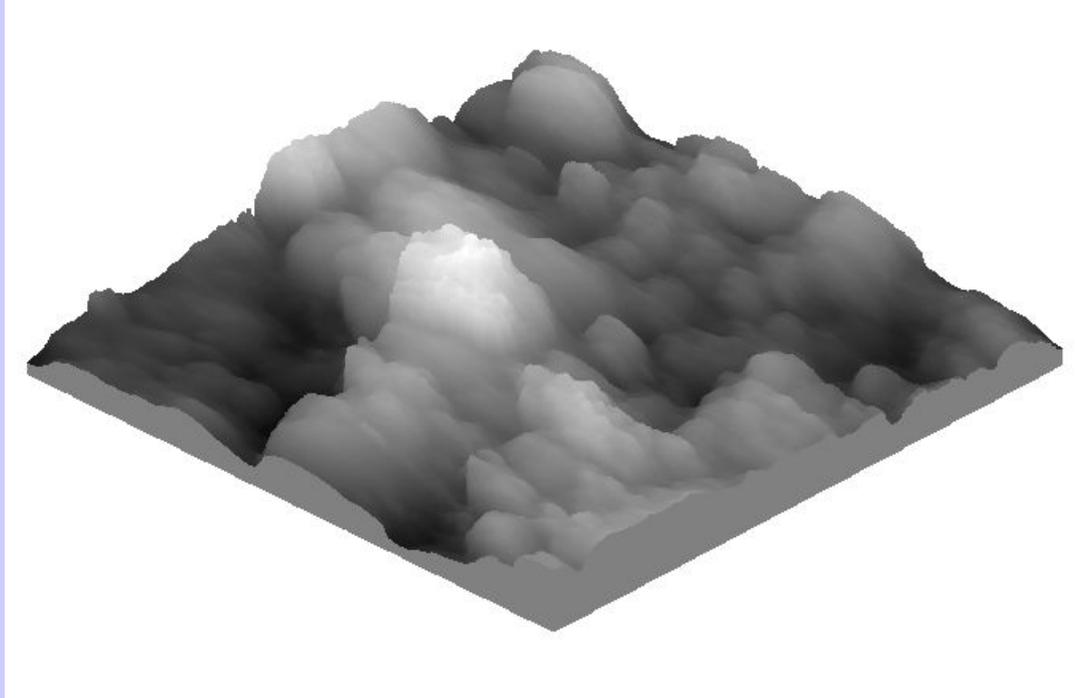
# Математическая обработка изображения.

## Построение профиля (Measure | Scan Section)

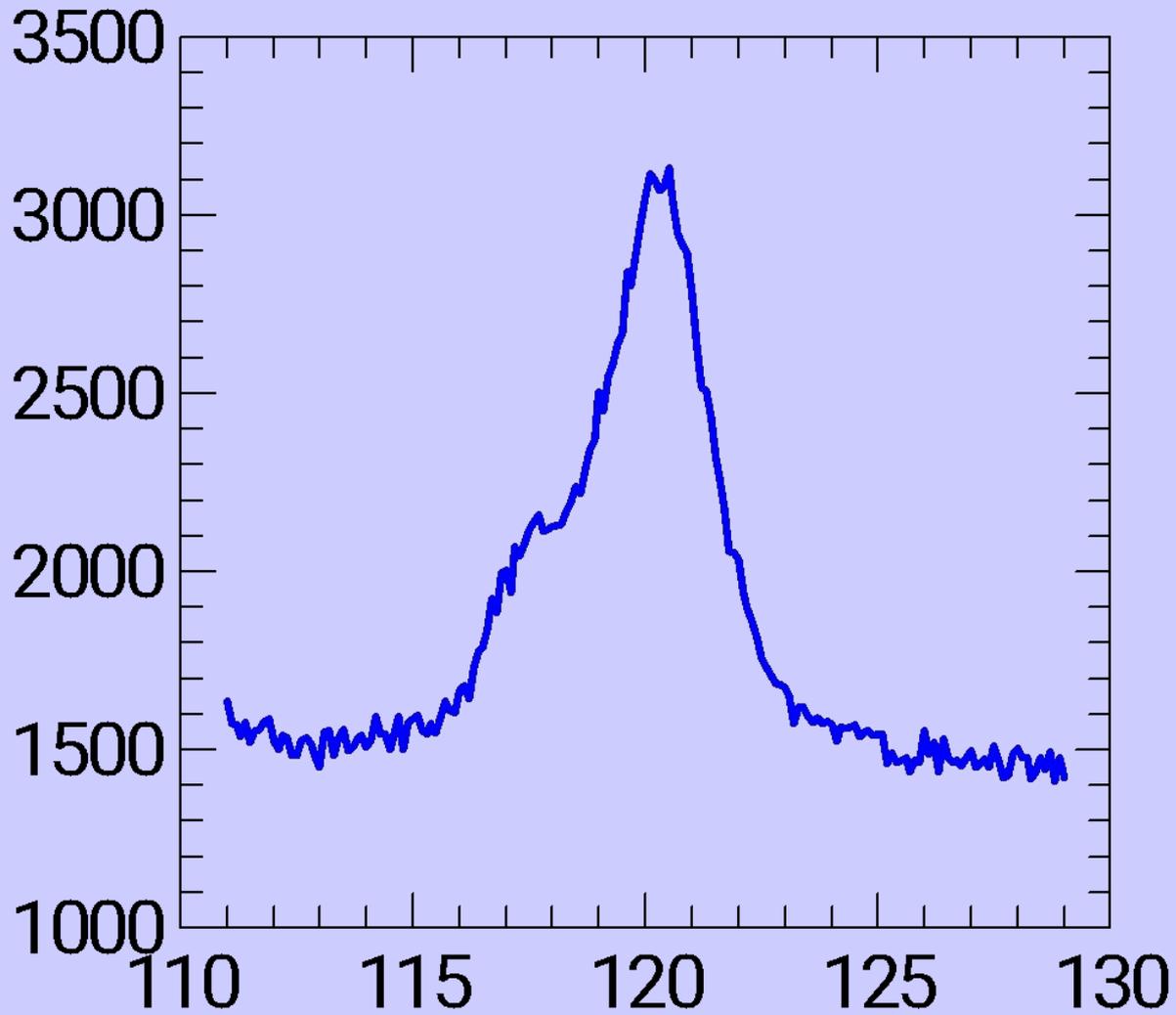


# Математическая обработка изображения.

## Построение 3D - изображения



# Спектр РФЭС



Углерод, 1s