

**Факультет наук о материалах, МГУ имени М.В.Ломоносова**

# **Зондовая микроскопия: методы, теория, приложения**

**Лекция 4.**

**Обработка изображений**

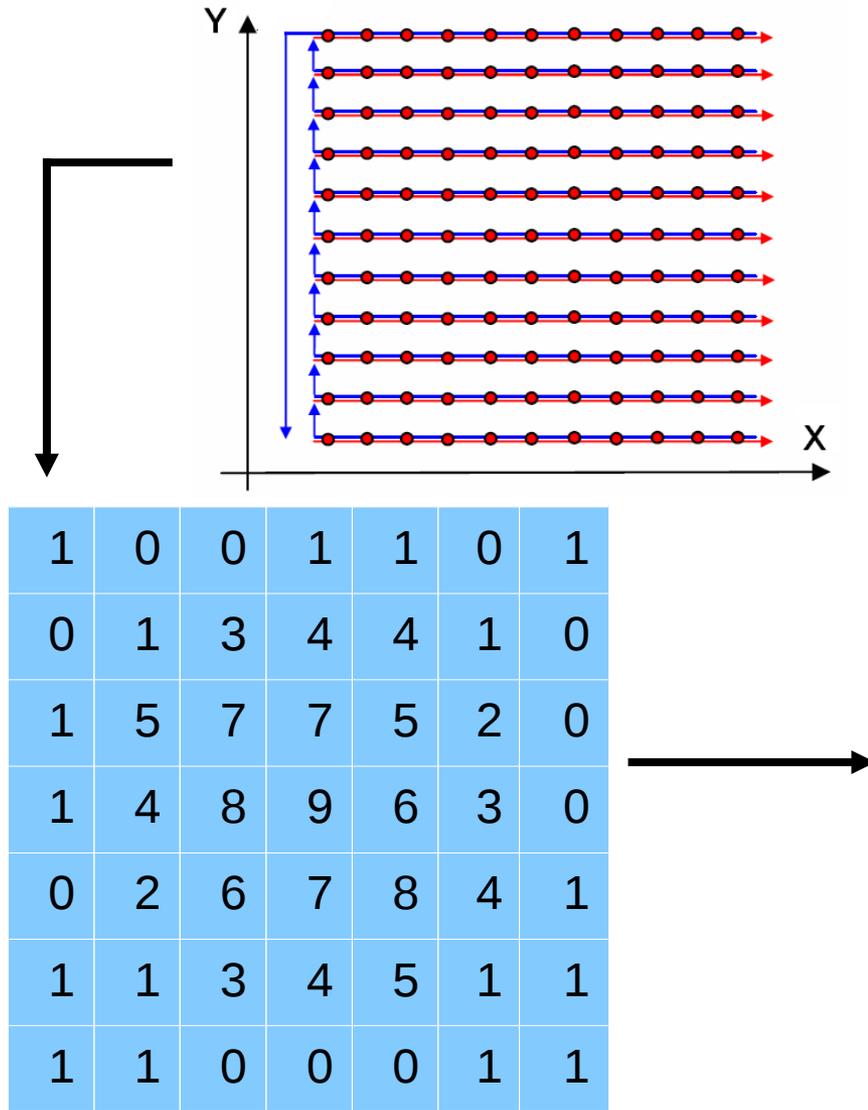
**О.В. Синицына, Г.Б. Мешков, Я.В. Гиндикин**

**12 марта 2018**

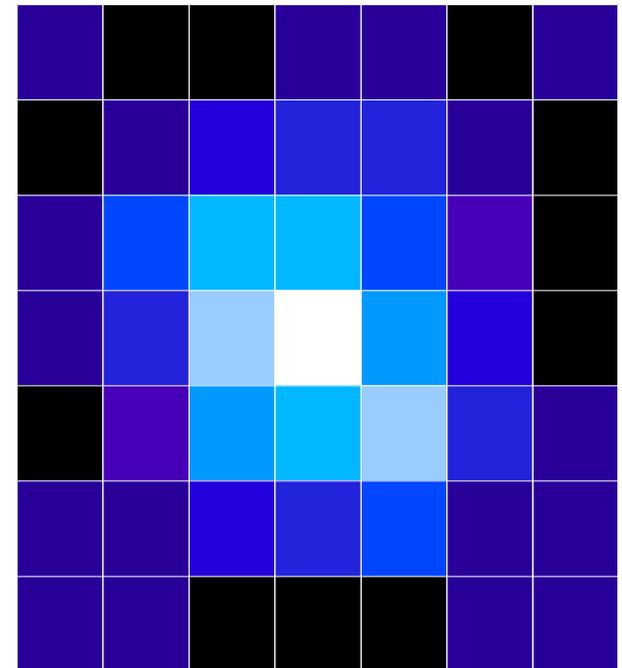
- Обработка изображений СЗМ
- Анализ данных
- Представление результатов

# Обработка изображений СЗМ

Задача обработки изображений — исключение артефактов, связанных с процессом измерения

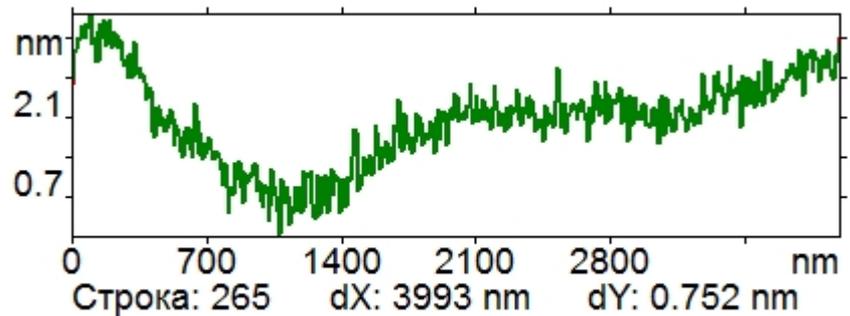
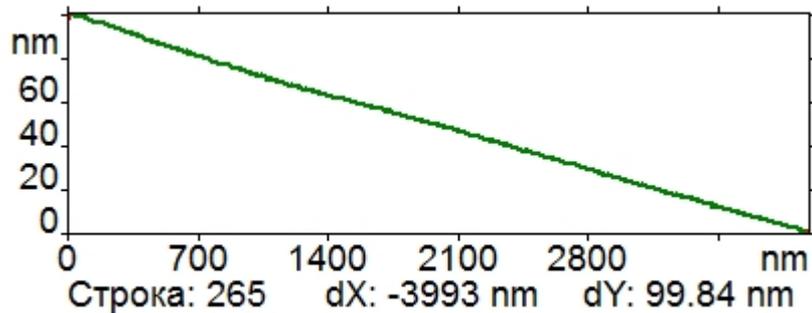
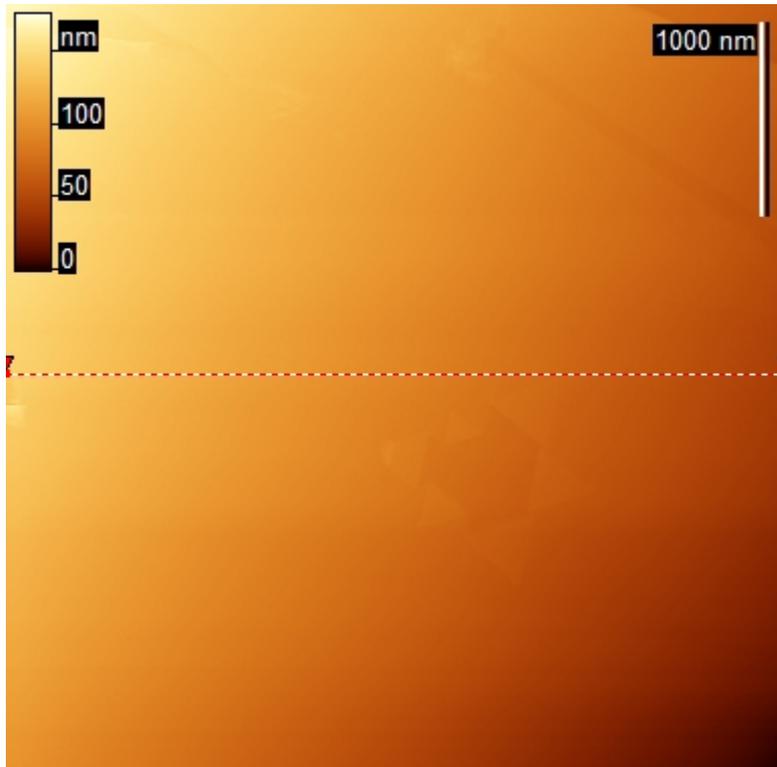


Наиболее распространённый размер кадра в СЗМ: 512x512 точек



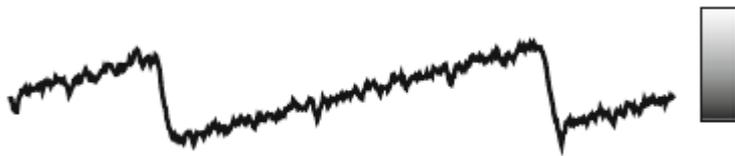
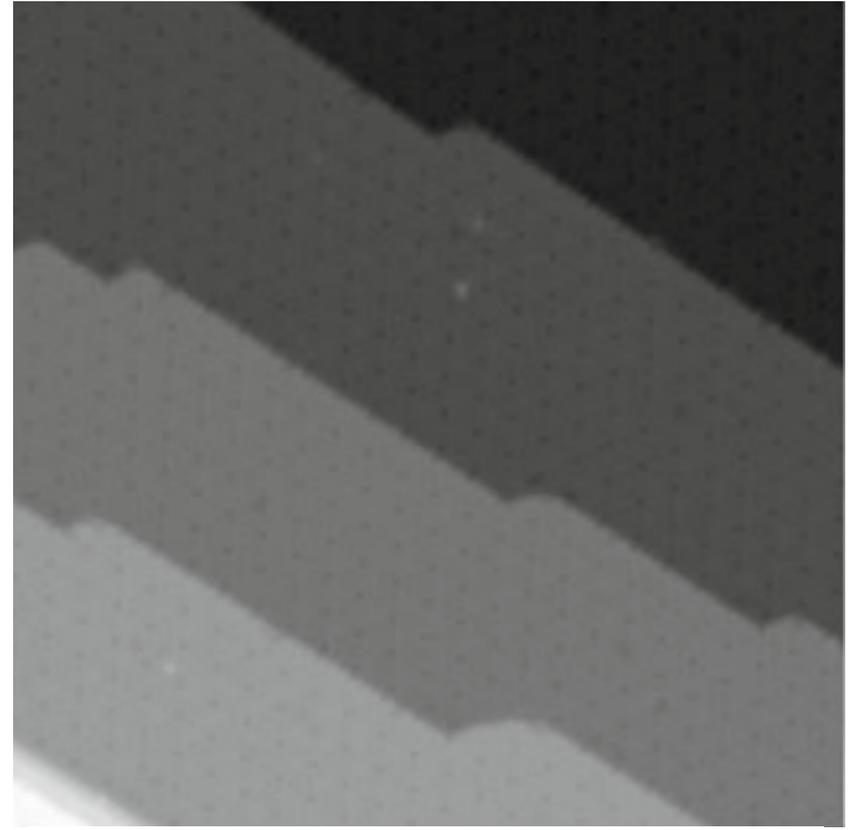
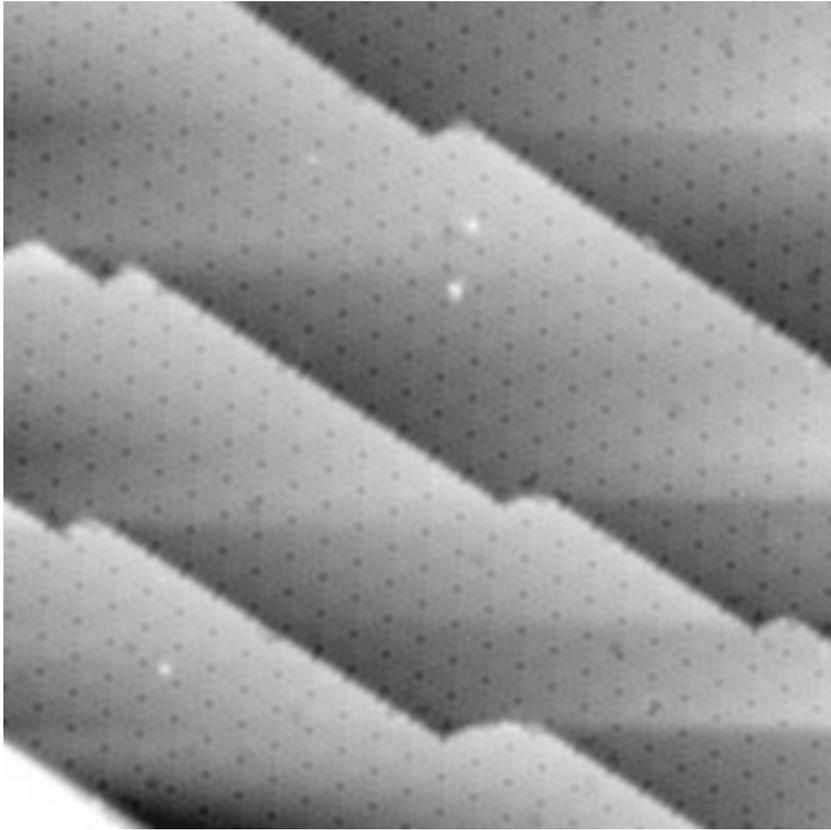
# Удаление наклона

Макроскопический наклон плоскости образца на угол  $1.4^\circ$



# Удаление наклона

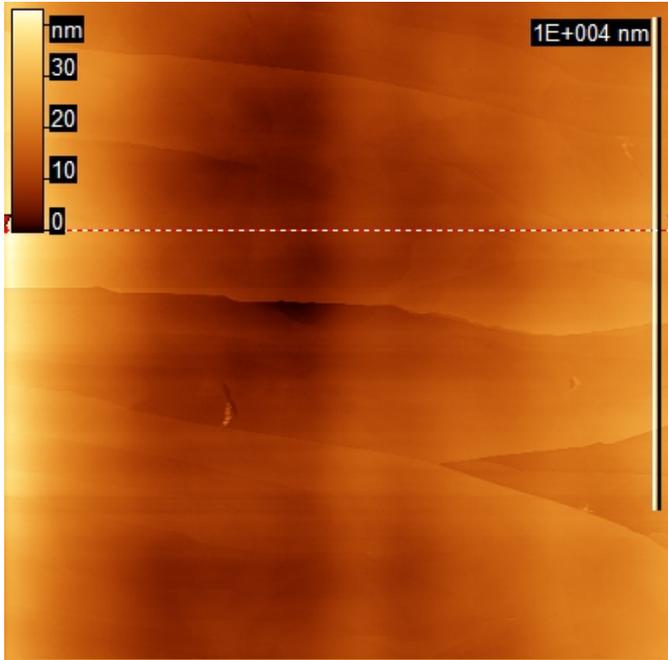
Удаляя одни артефакты, не создайте новых!



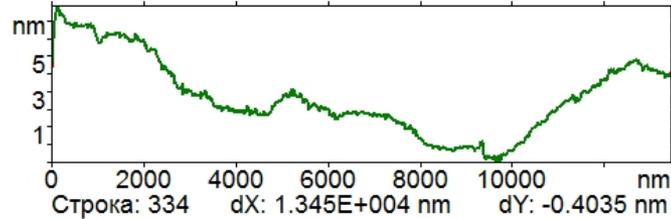
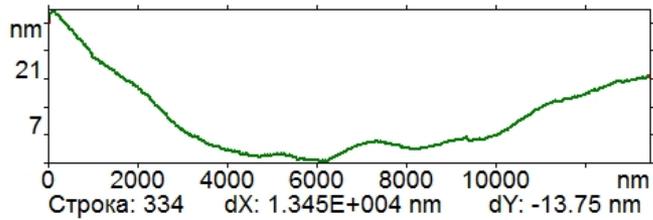
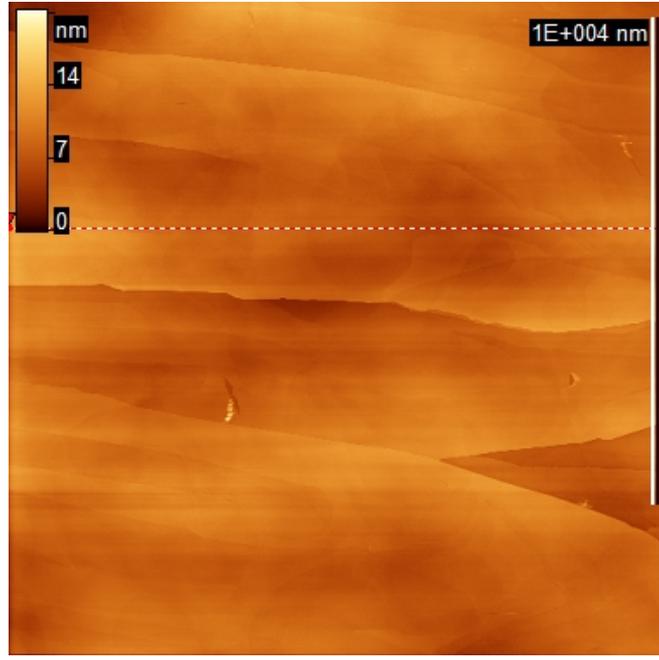
Изображения заимствованы из книги В. Voigtlaender. Scanning Probe Microscopy. Atomic Force Microscopy and Scanning Tunneling Microscopy. Springer-Verlag, Berlin, 2015

# Вычитание поверхностей высших порядков

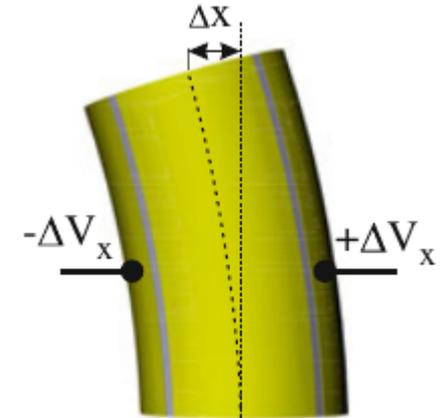
До вычитания фона



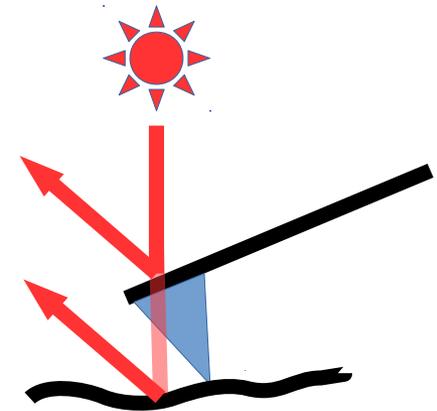
После вычитания фона



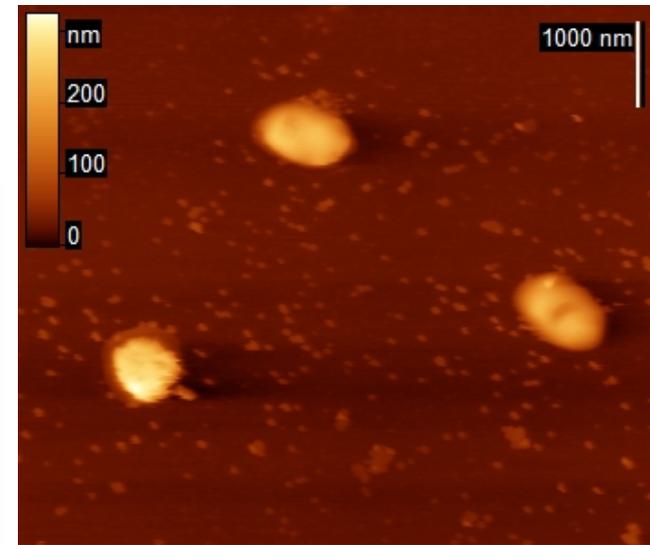
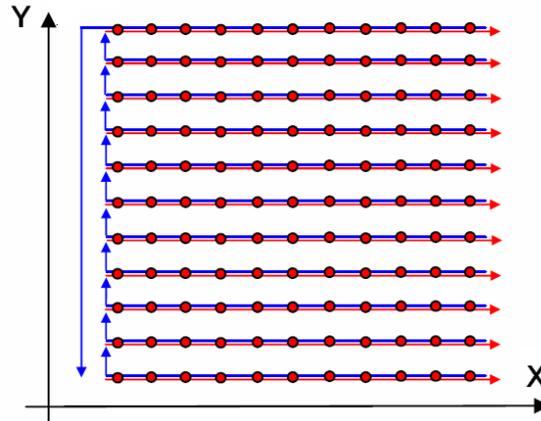
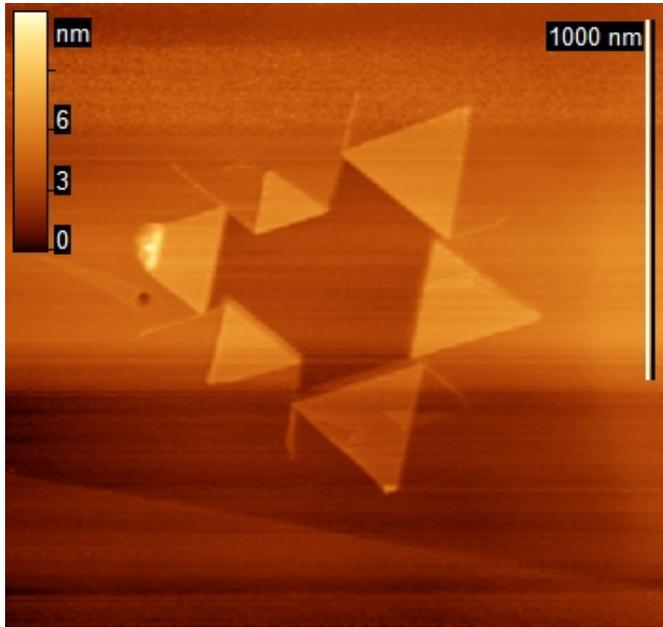
Коррекция движения  
пьезотрубки



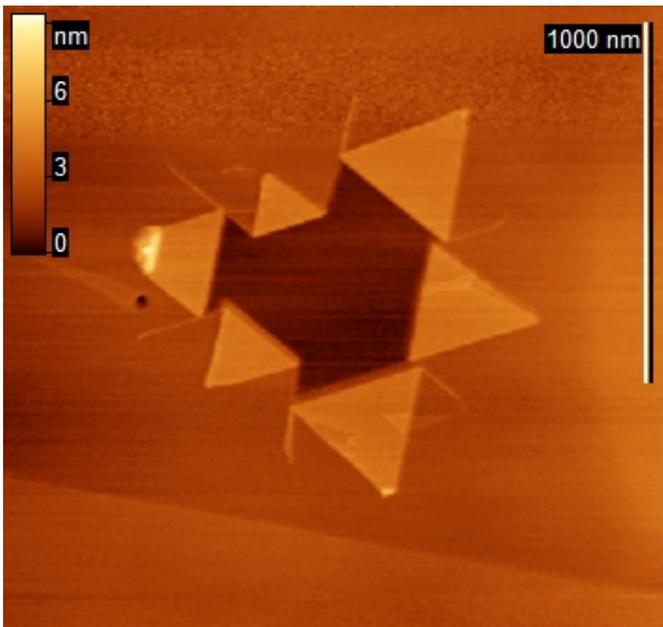
Коррекция  
интерференции в АСМ



# Усреднение по строкам

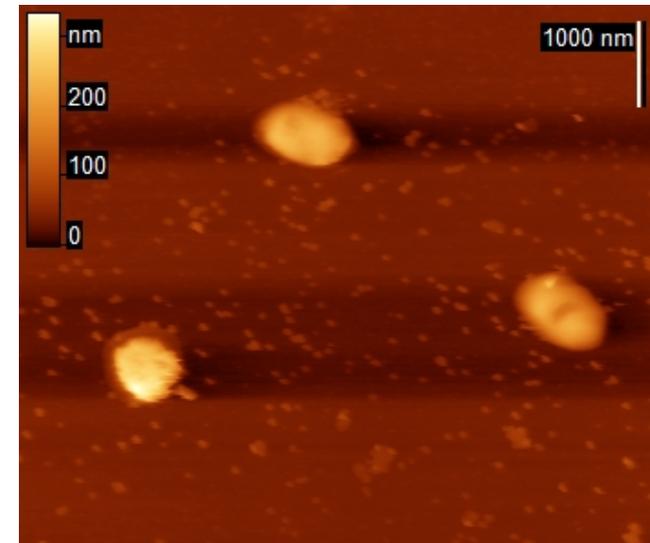


Области, содержащие  
высокие объекты,  
должны исключаться

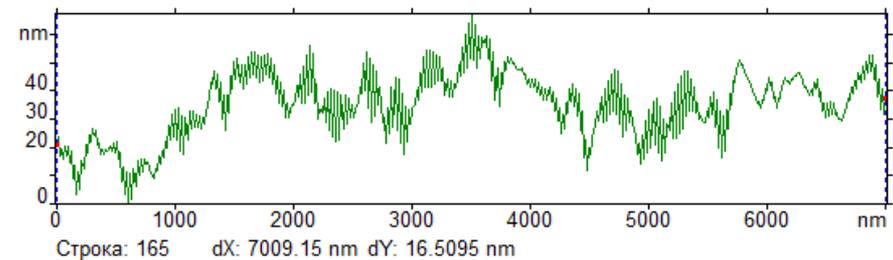
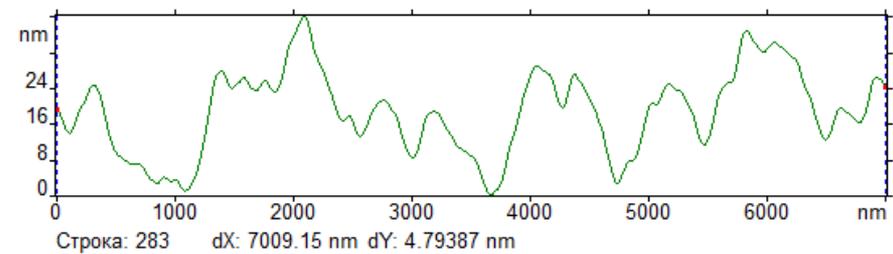
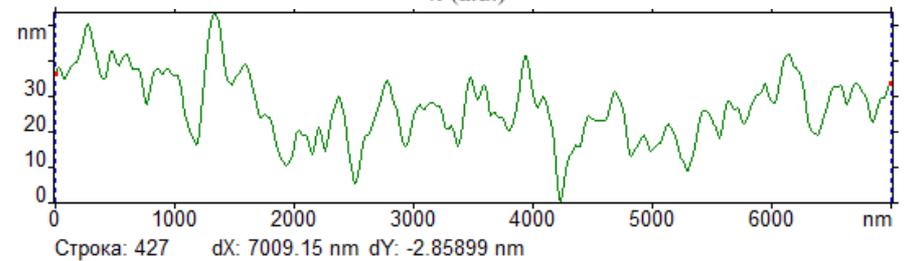
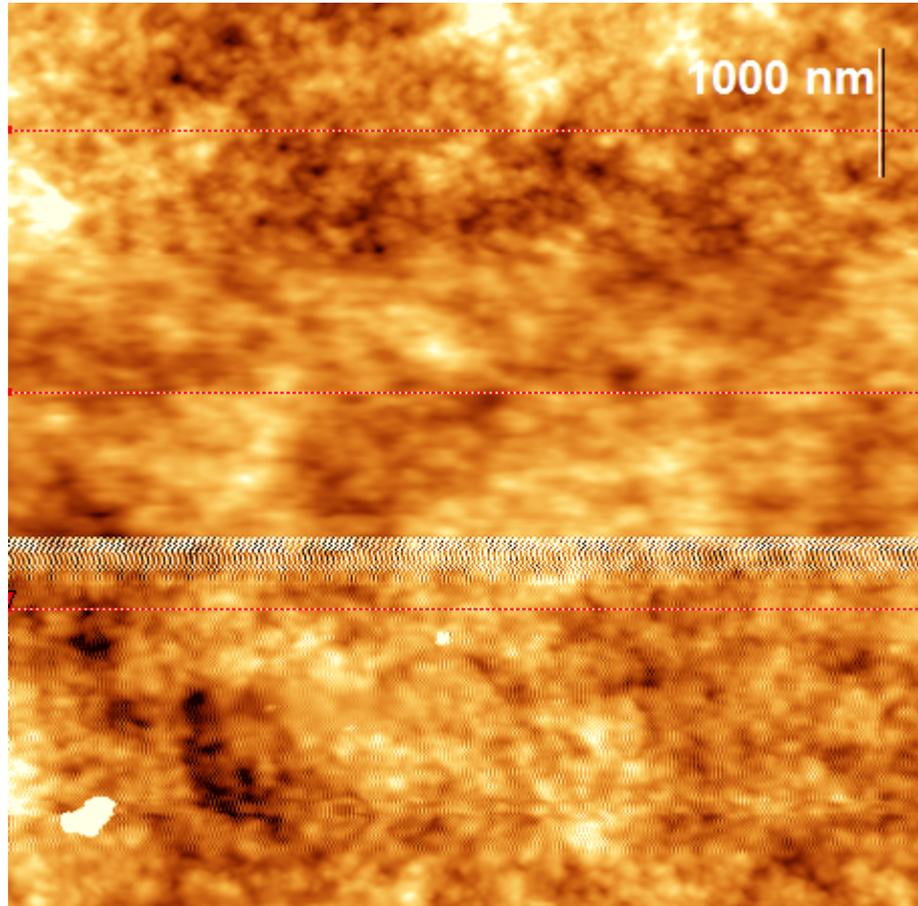
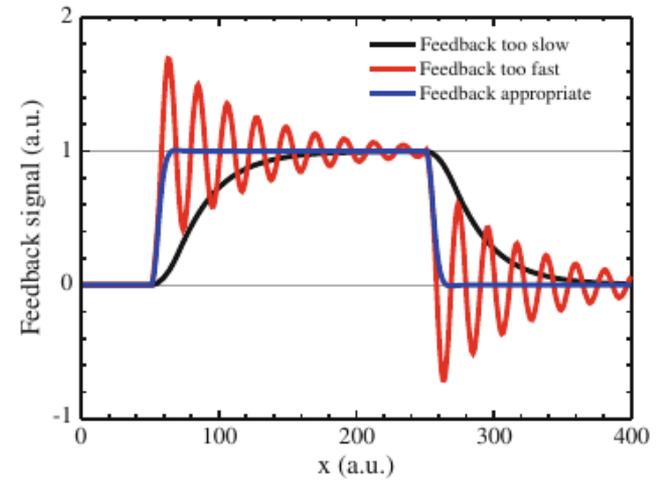


X — быстрая строка  
Y — медленная строка

$$Z'_{ij} = Z_{ij} - \frac{\sum_{j=1}^N Z_{ij}}{N}$$



# Работа обратной связи и вид изображения



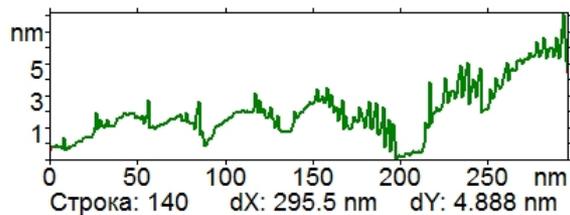
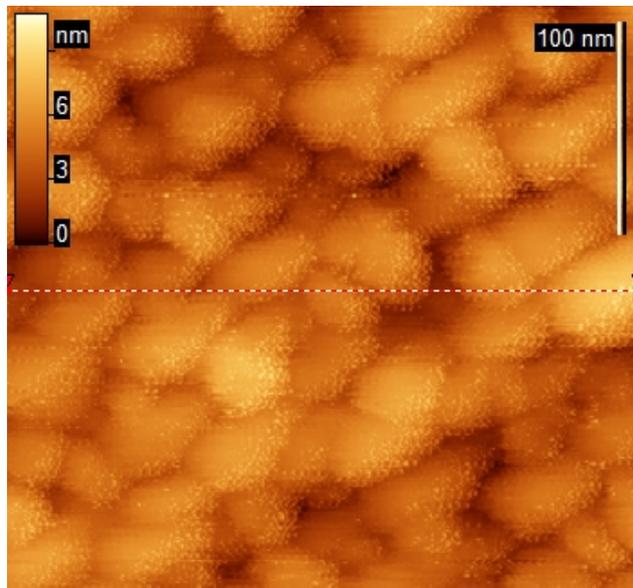
## Устранение шумов. Усреднение

1	1	2	3	1	1	1
1	1	2	3	1	1	1
2	2	3	4	2	2	2
2	2	2	3	4	2	2
3	3	5	6	5	3	3
4	4	2	1	2	2	2
4	4	2	1	2	2	2

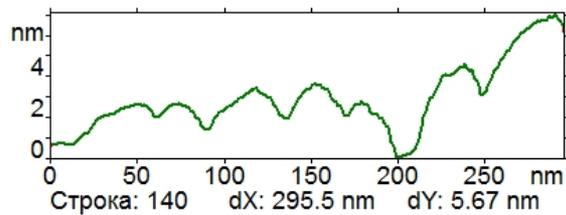
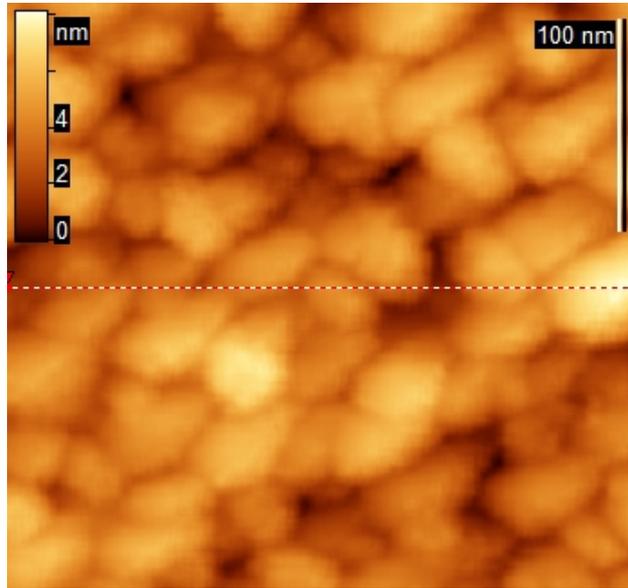
- Выбирается размер окна (в примере 3x3, черная рамка)
- В окне считается среднее значение и присваивается центральной ячейке (выделена красным)
- На границах для работы фильтра требуется расширение изображения, например путем «отражения» (серые ячейки)

# Устранение шумов. Усреднение

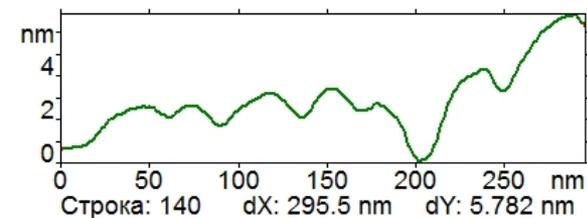
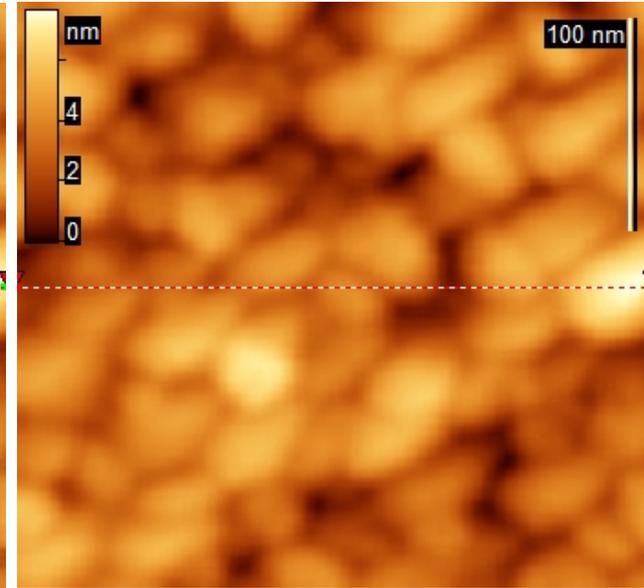
Исходное изображение



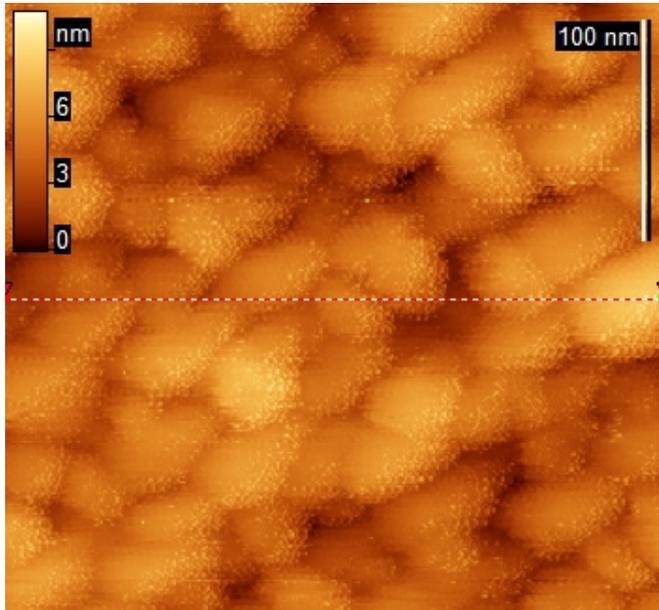
Усреднение  
Окно 5x5



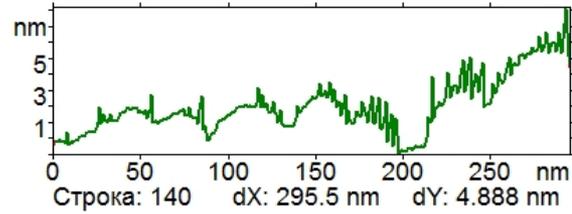
Усреднение  
Окно 9x9



# Устранение шумов. Медианная фильтрация

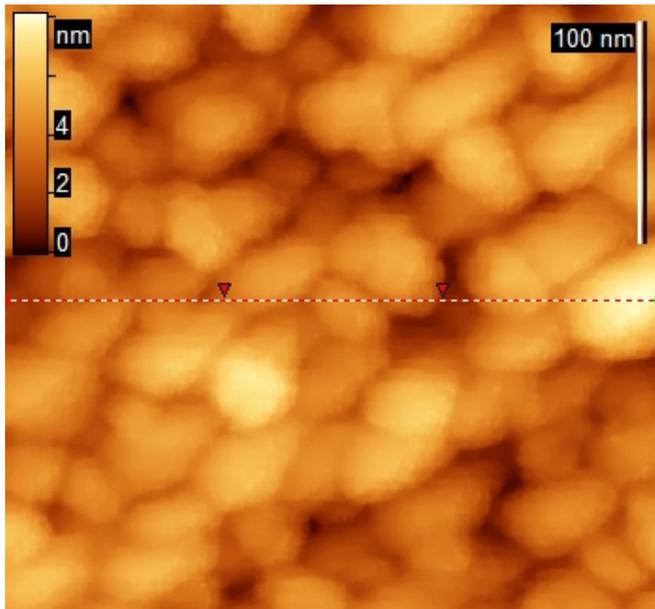


Исходное изображение

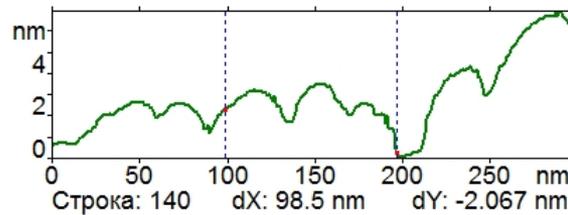


1	0	1
1	9	1
2	1	2

0 1 1 1 1 1 2 2 9



Медианный фильтр  
Окно 5x5



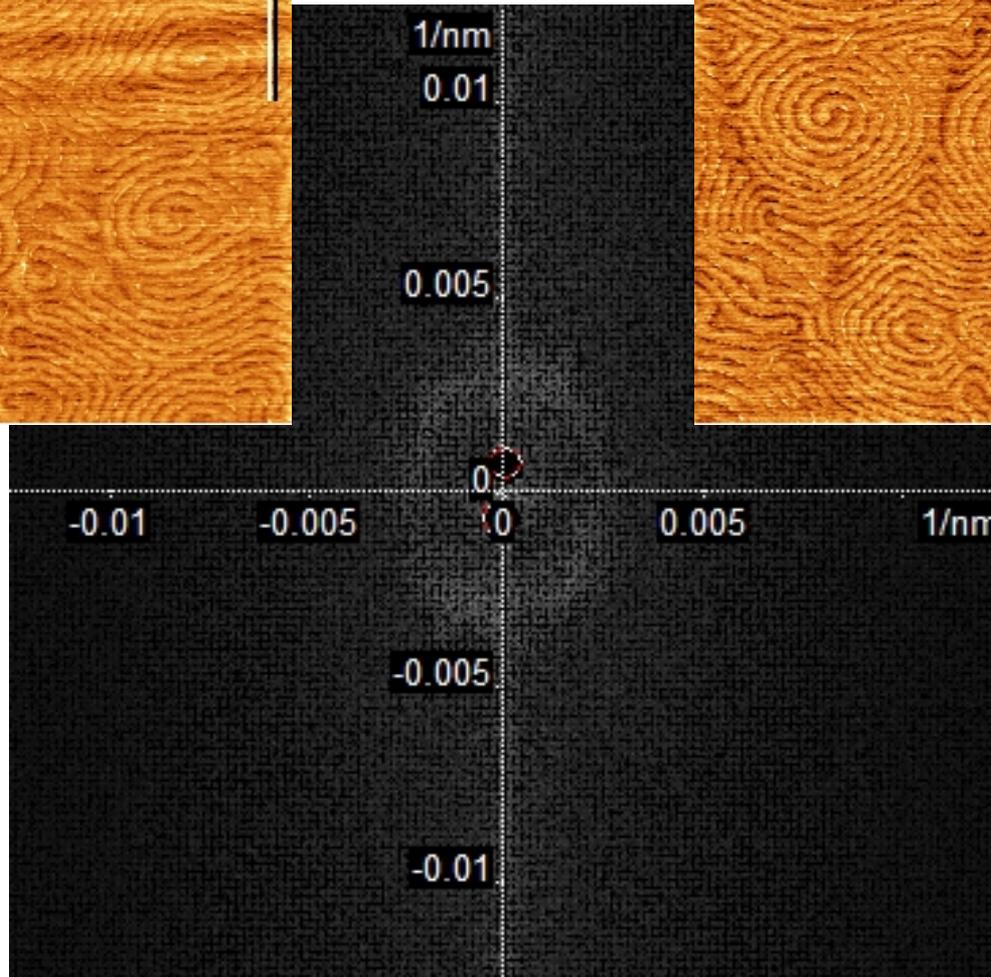
Медианное значение 1

Среднее значение 2

# Фурье - фильтрация



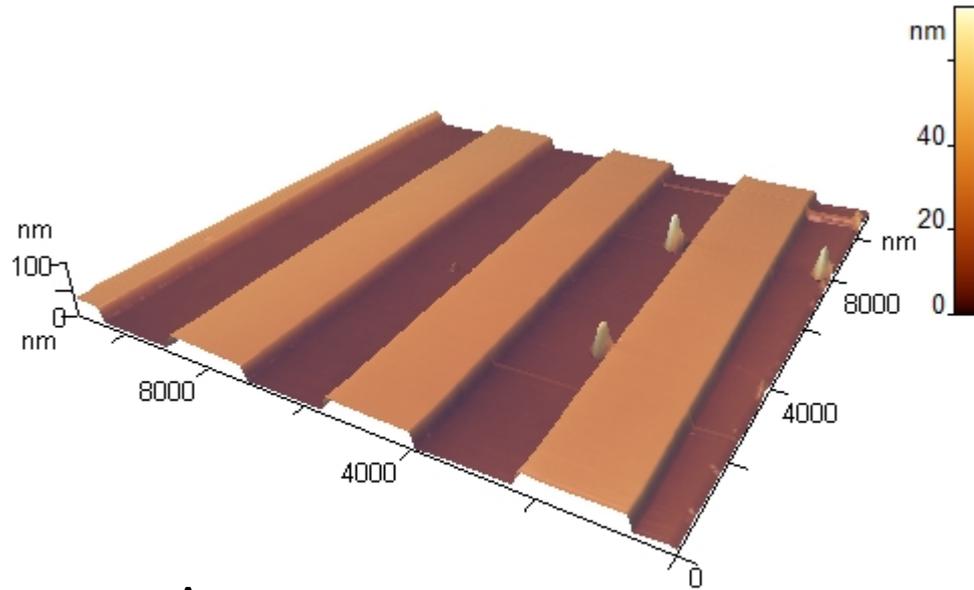
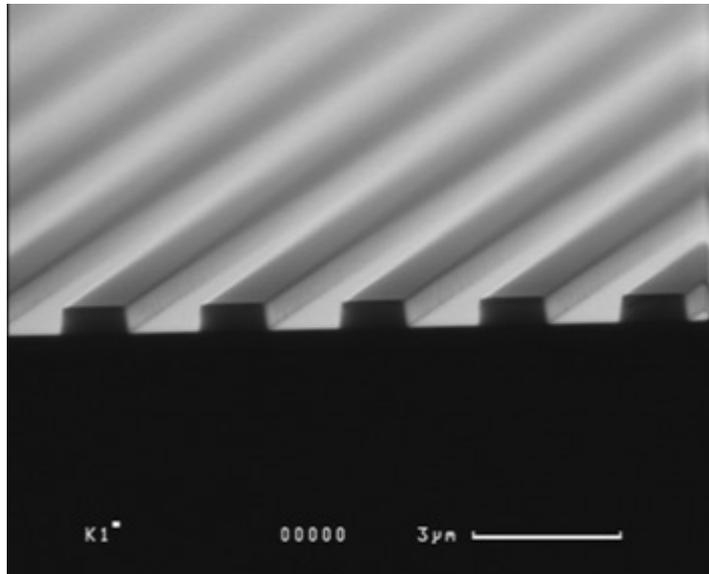
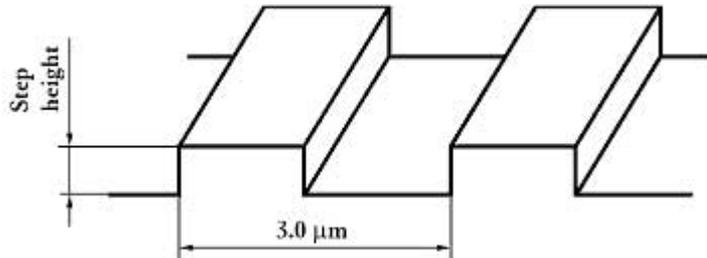
Исходное изображение



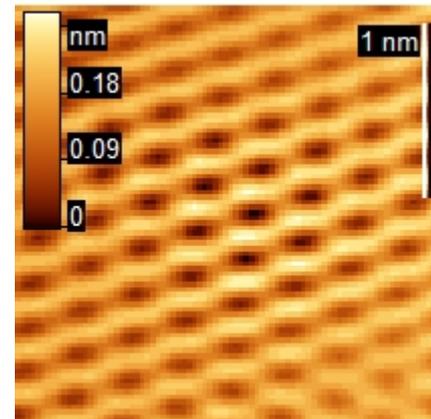
После фильтрации

# Калибровка сканера

Калибровочная  
решетка из TGZ1

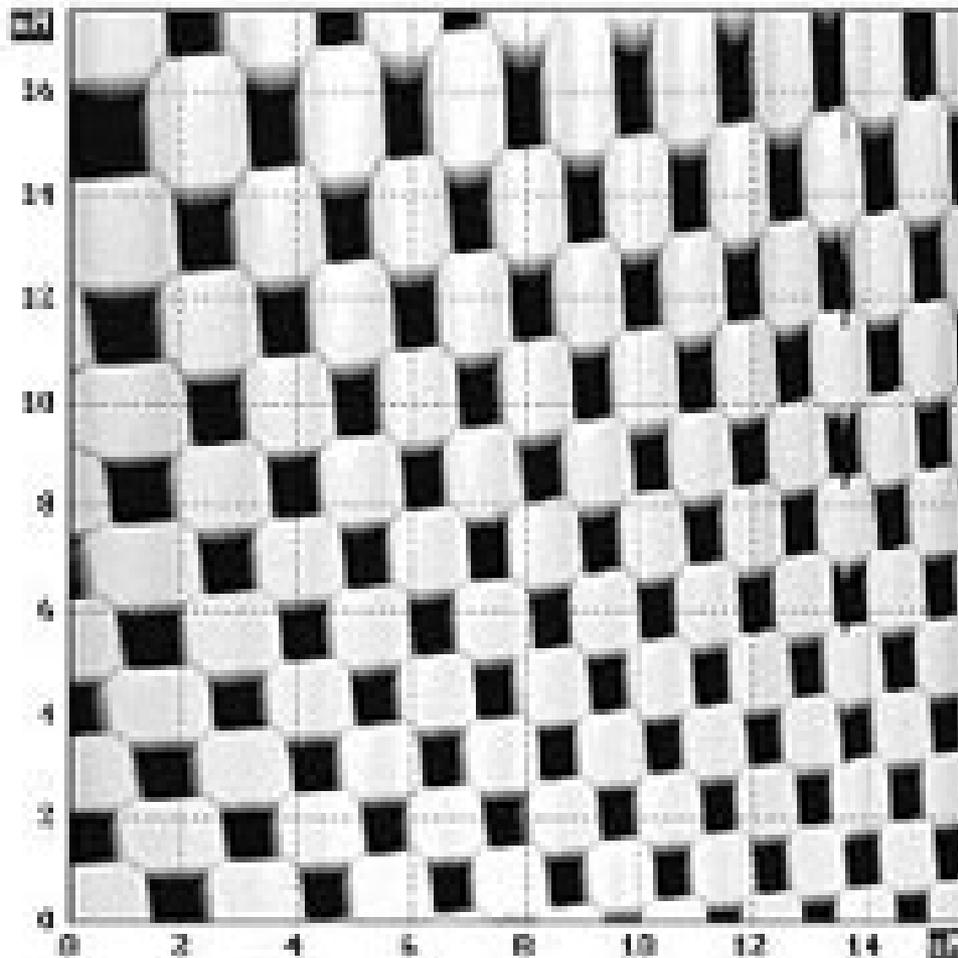


Атомные решетки для  
калибровки  
Атомы на графите (СТМ):



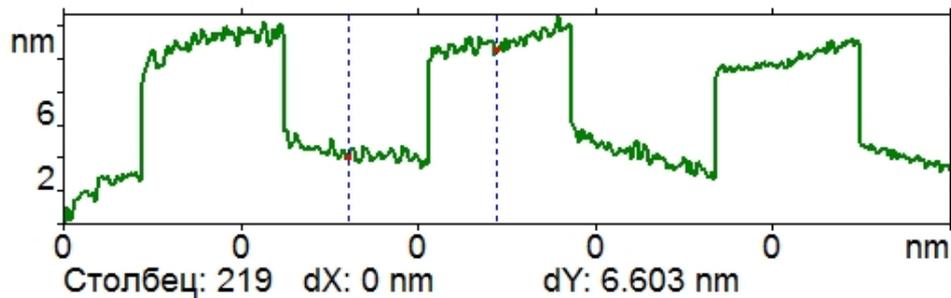
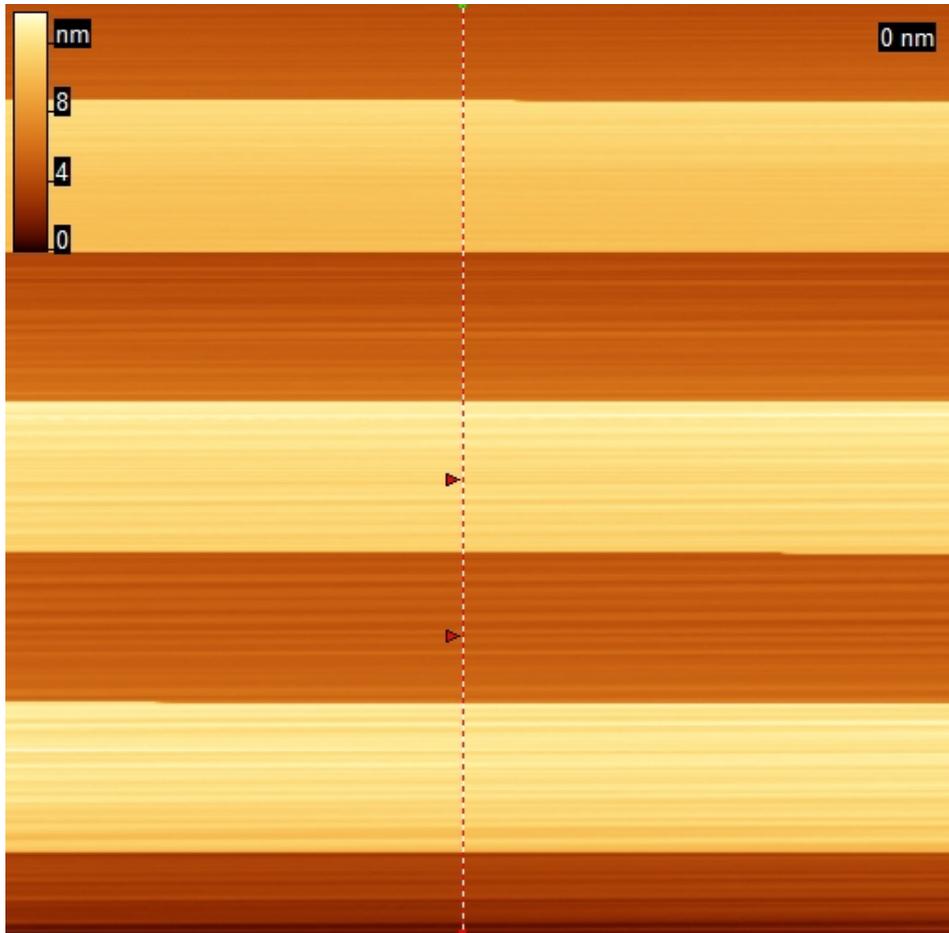
Изображения заимствованы с сайта:  
<http://www.ntmdt-tips.com/products/view/tgz1>

# Корректировка гистерезиса



Искажение изображения калибровочной решетки из-за нелинейности сканера. Заимствовано из <http://www.spmtips.com/tgx>

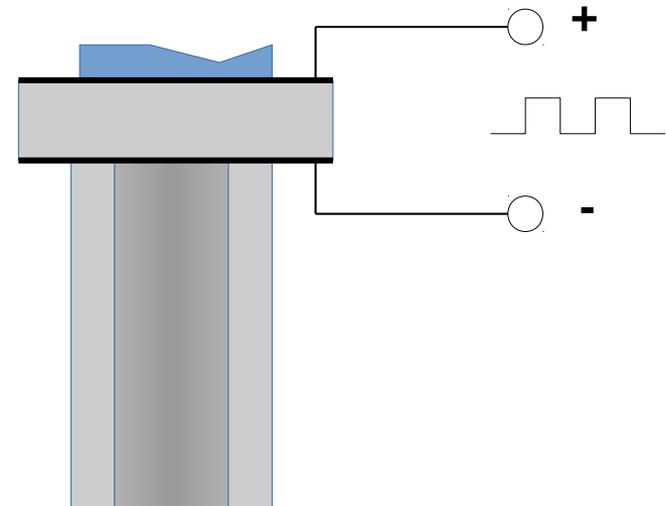
# Эталон нанометра



$$d_{33} = 200 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}$$

$$V = 5 \text{ В}$$

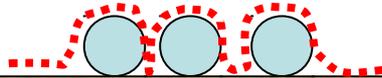
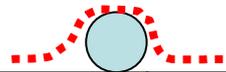
$$\Delta Z = 1 \text{ нм}$$



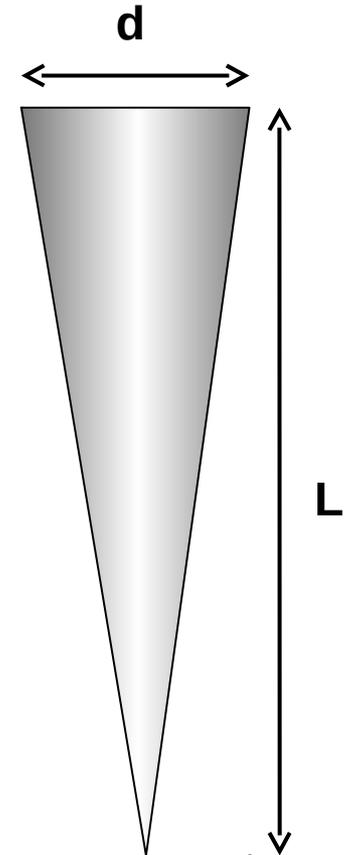
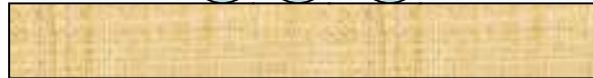
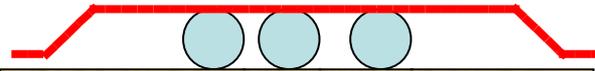
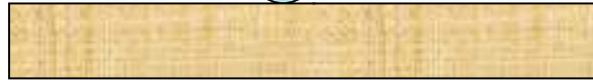
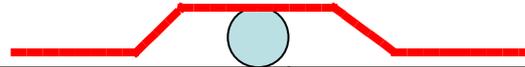
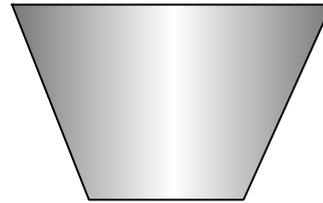
Калибровочный эталон для  
профилометров и сканирующих  
зондовых микроскопов  
Яминский И.В., Яминский Д.И.  
Патент РФ №2011116258, 2008 г.

# Параметры зонда и разрешение

Острый зонд



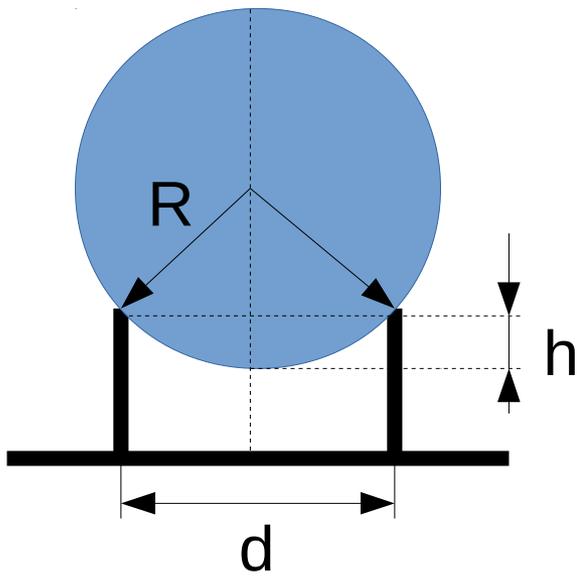
Тупой зонд



Параметры зонда, определяющие разрешение:  
радиус закругления острия и аспектное отношение ( $L/d$ )

# Параметры зонда и разрешение

## Зонды с несимметричными остриями

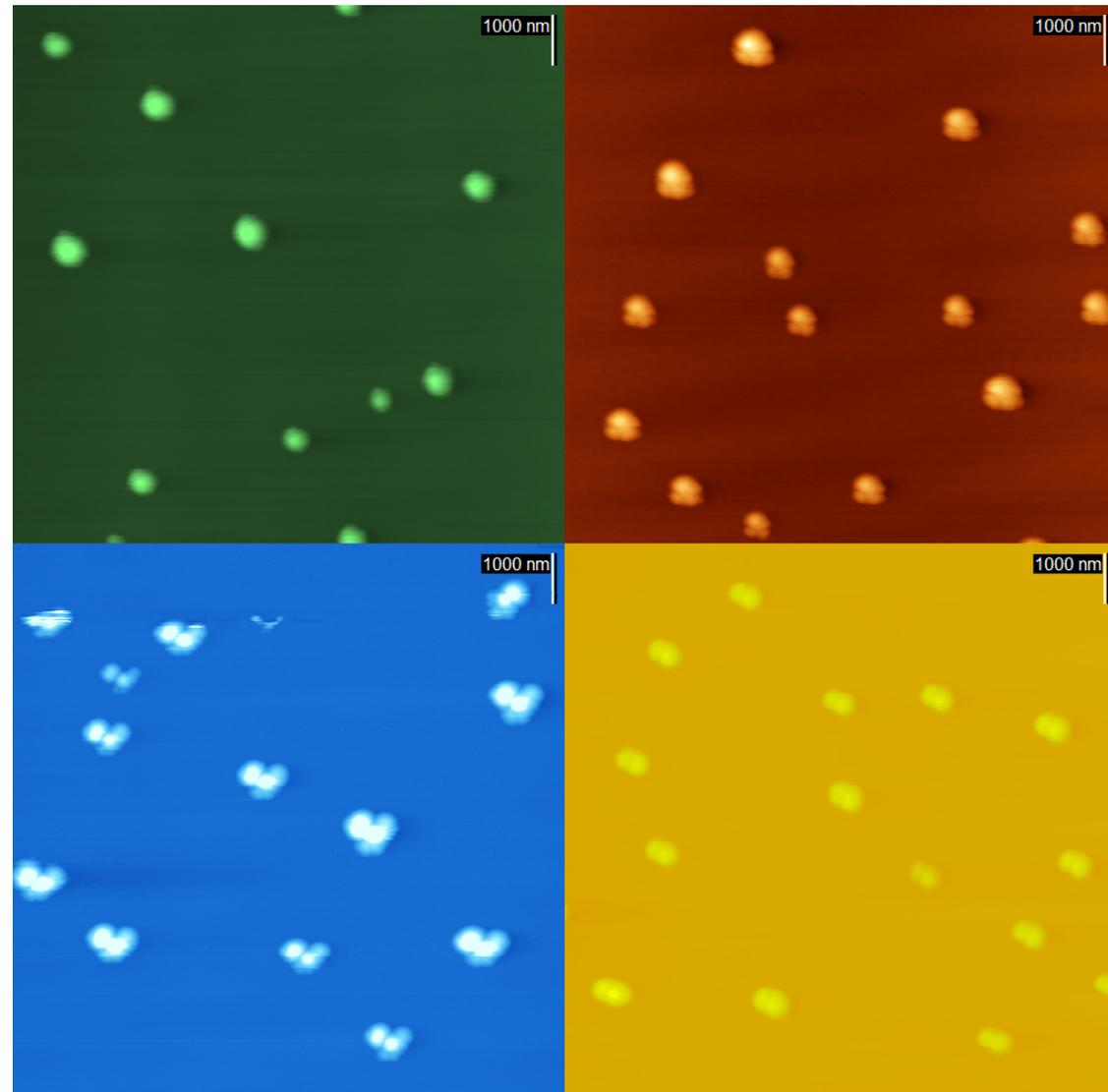


$$d = 2 \cdot \sqrt{2Rh - h^2}$$

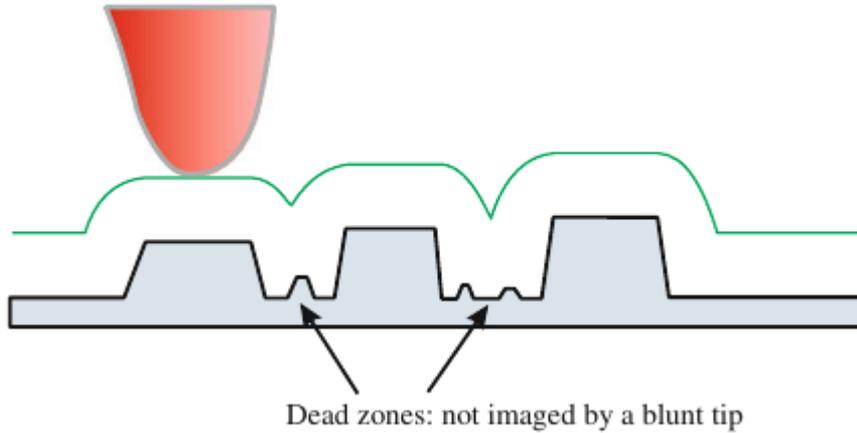
Амплитуда шума ( $s$ ) = 0.1 нм  
Чтобы увидеть два объекта  $h > s$

Радиус острия зонда  $R = 10$  нм  
Разрешение  $d \sim 2.8$  нм

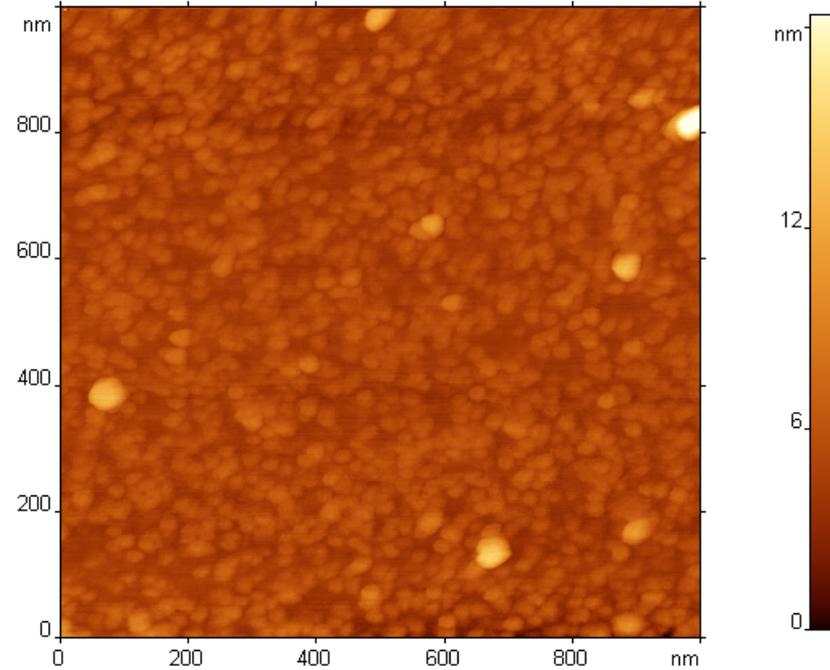
$R = 0.1$  нм,  $d = 0.2$  нм



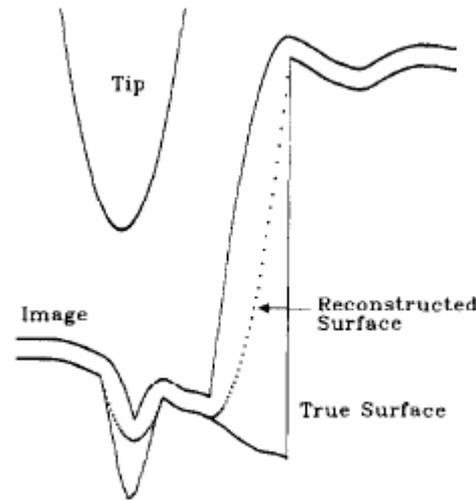
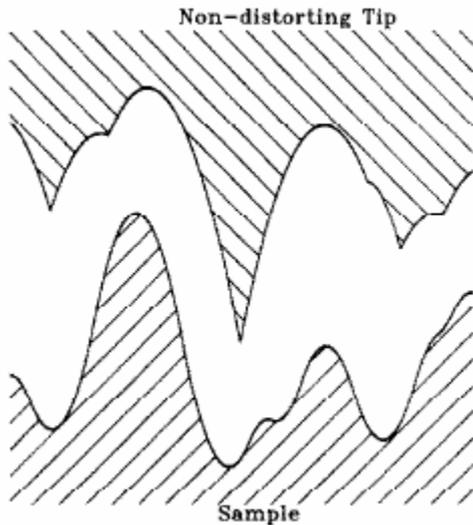
# Деконволюция изображений



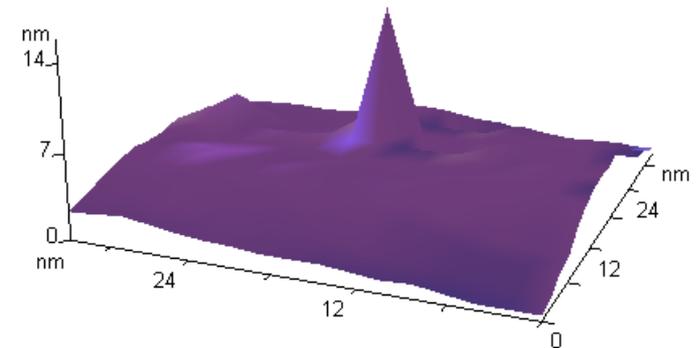
Белок на слюде



B. Voigtlaender. Scanning Probe Microscopy. Atomic Force Microscopy and Scanning Tunneling Microscopy. Springer-Verlag, Berlin, 2015



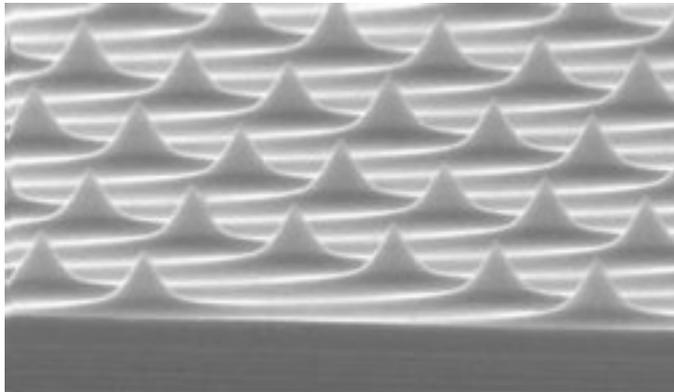
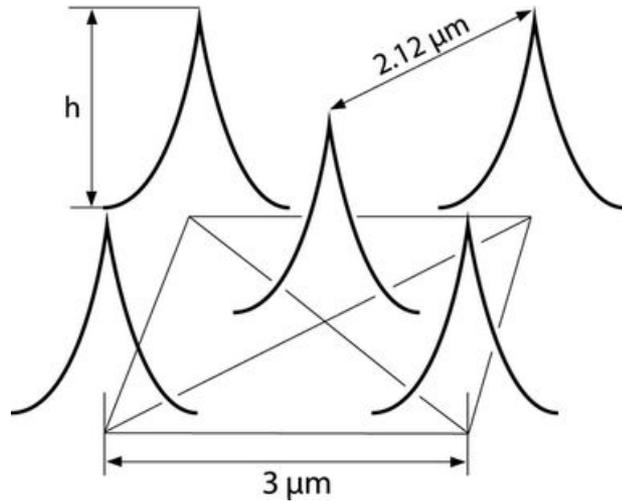
Слепая аппроксимация острия



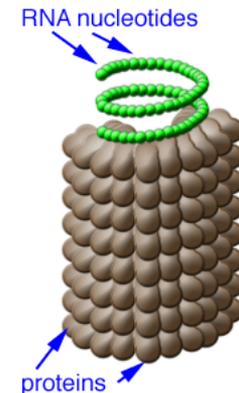
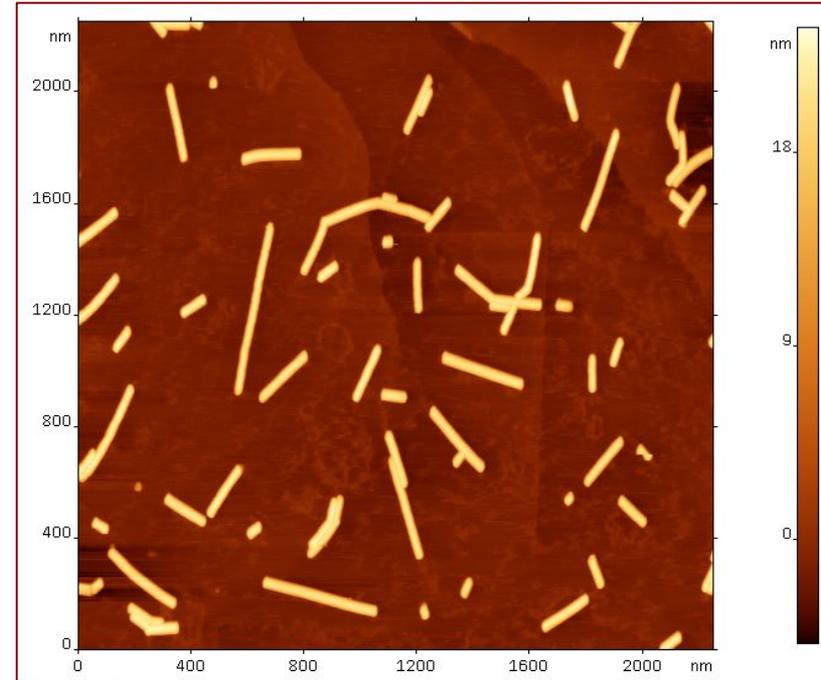
J.S. Villarrubia. Surf. Sci., 1994, 321, 287

# Определение формы зонда

Калибровочная  
решетка из TGT1



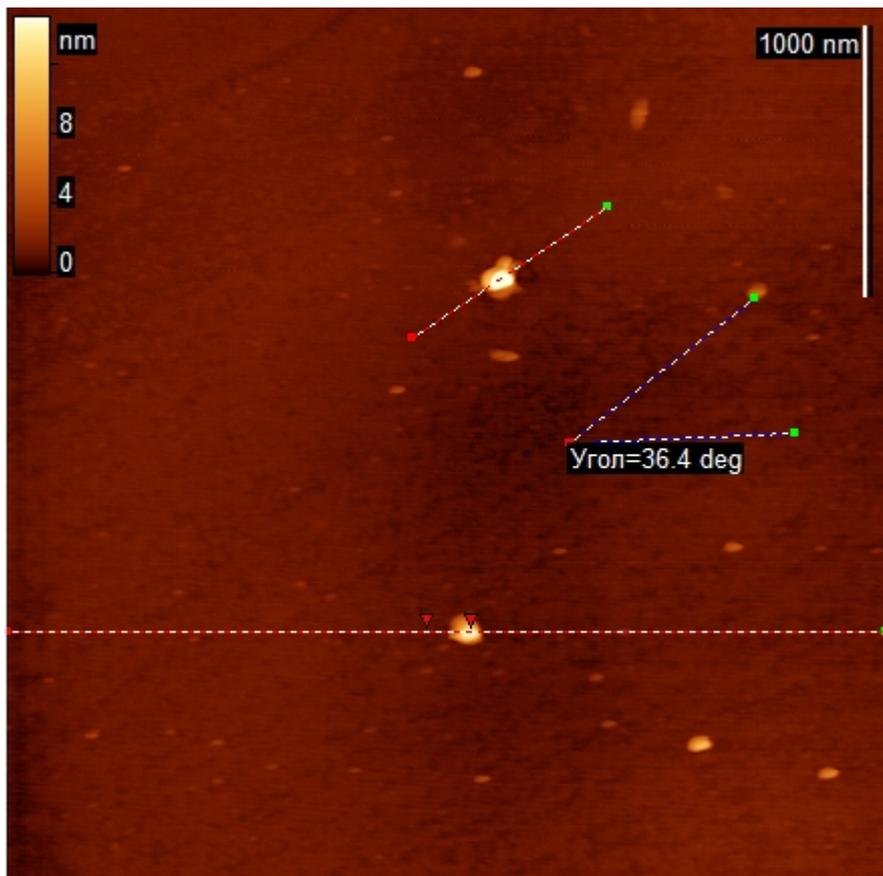
Частицы ВТМ, цилиндры с  
диаметром 18 нм.



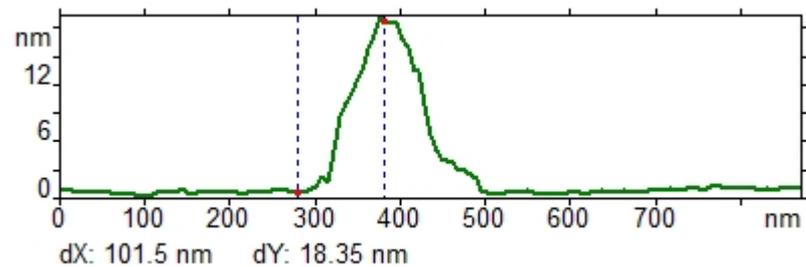
Изображение  
заимствовано с сайта:  
<http://concerncrisis.blogspot.ru/2008/03/tobacco-mosaic-virus-tmv.html>

Изображения заимствованы с сайта:  
<http://www.ntmdt-tips.com/products/view/tgt1>

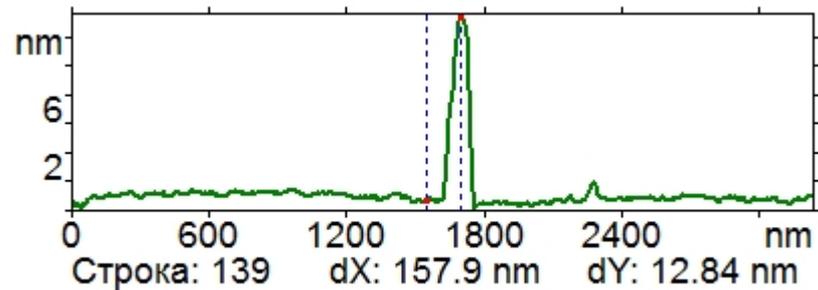
# Измерение длин, высот, углов



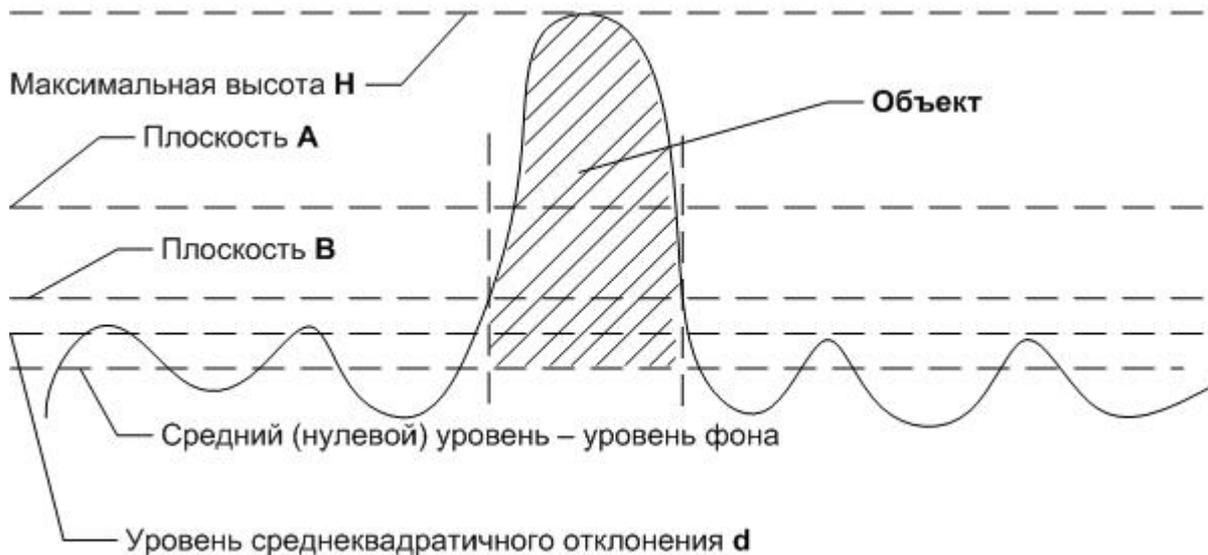
Сечение поверхности



Сечение вдоль строки быстрого сканирования

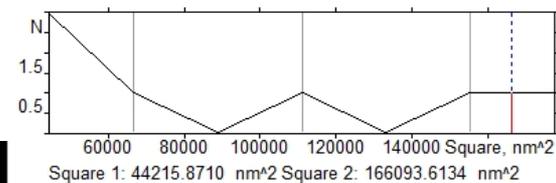


# Автоматический поиск объектов

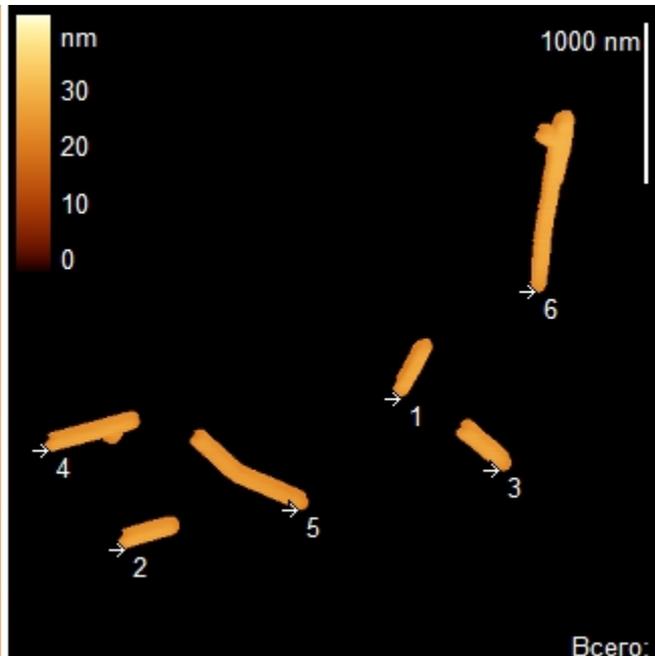
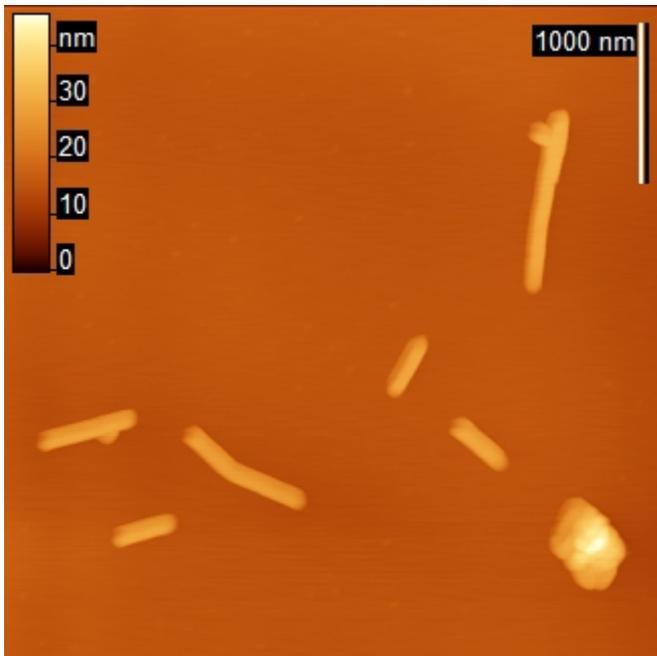


Пороговая плоскость —  $\min(A, B)$ , или задается вручную

Изображение заимствовано с сайта: [www.femtoscanonline.com](http://www.femtoscanonline.com)

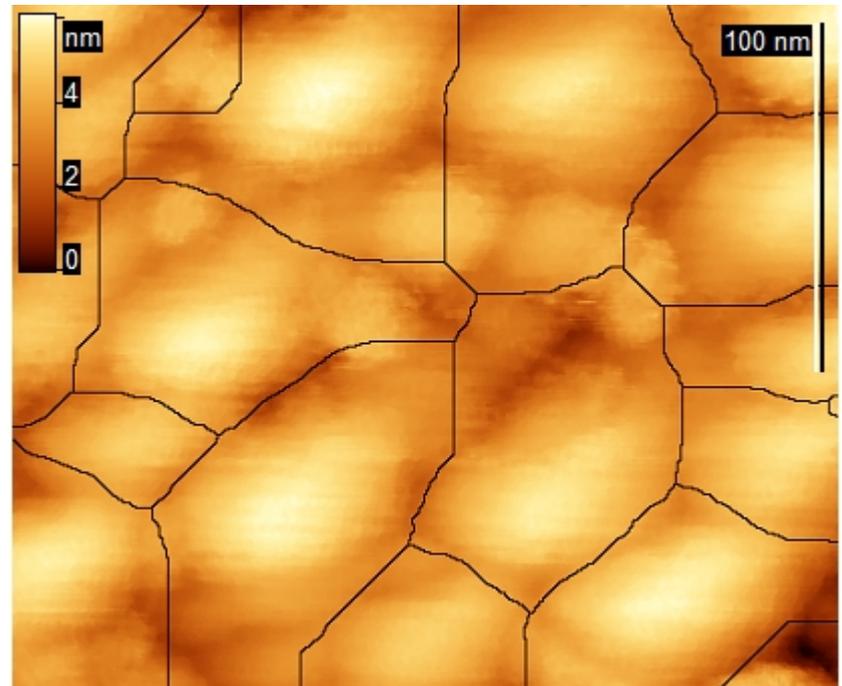
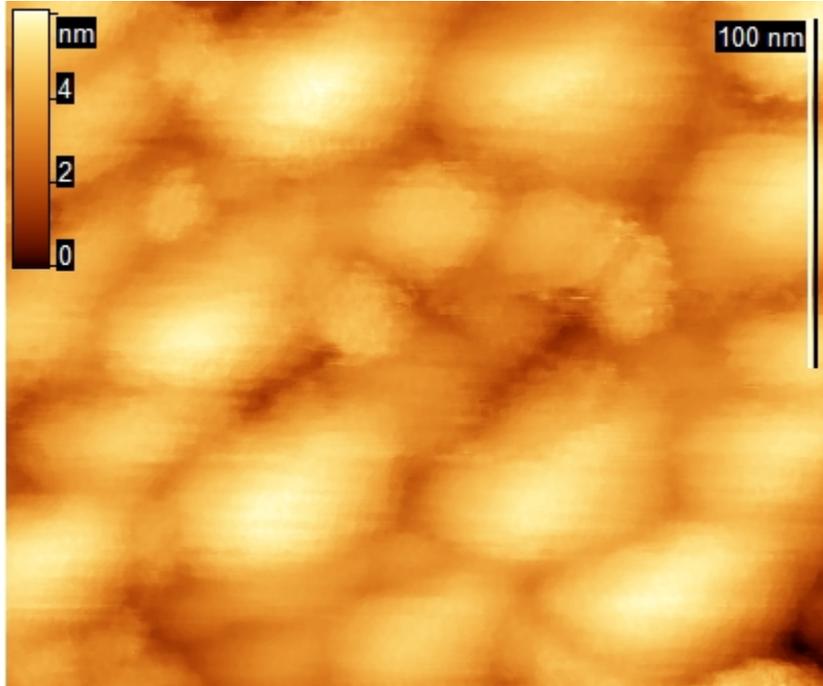


Сquare 1: 44215.8710 nm<sup>2</sup> Сquare 2: 166093.6134 nm<sup>2</sup>



N	S, $\mu\text{m}^2$	H, нм
1	0.004	15
2	0.005	16
3	0.005	15
4	0.008	15
5	0.010	14
6	0.015	17

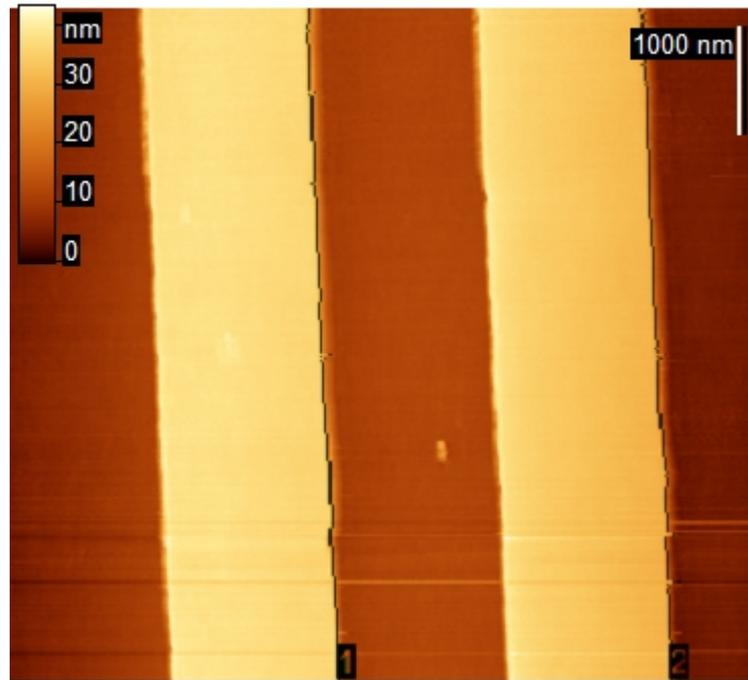
# Поиск зерен



Использован алгоритм роста зерен

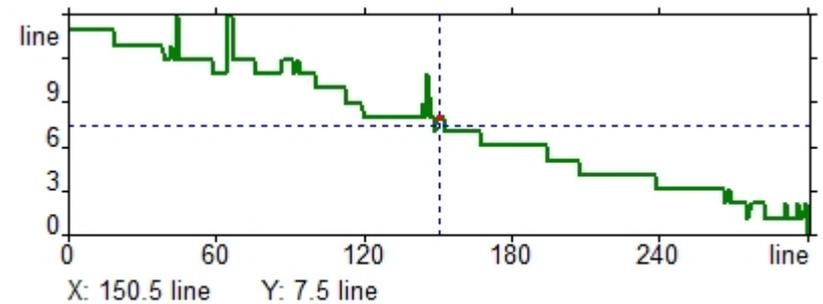
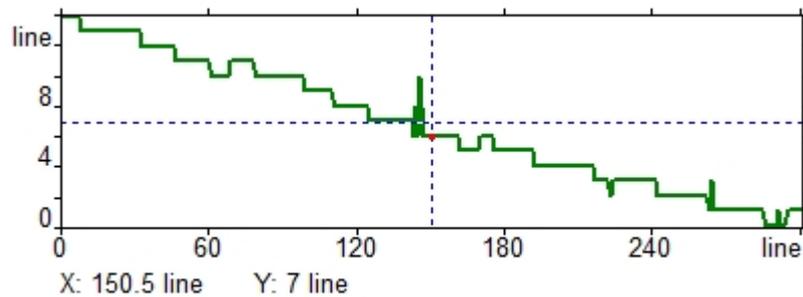
# Поиск ступеней

Ищутся ступени в направлении сверху-вниз

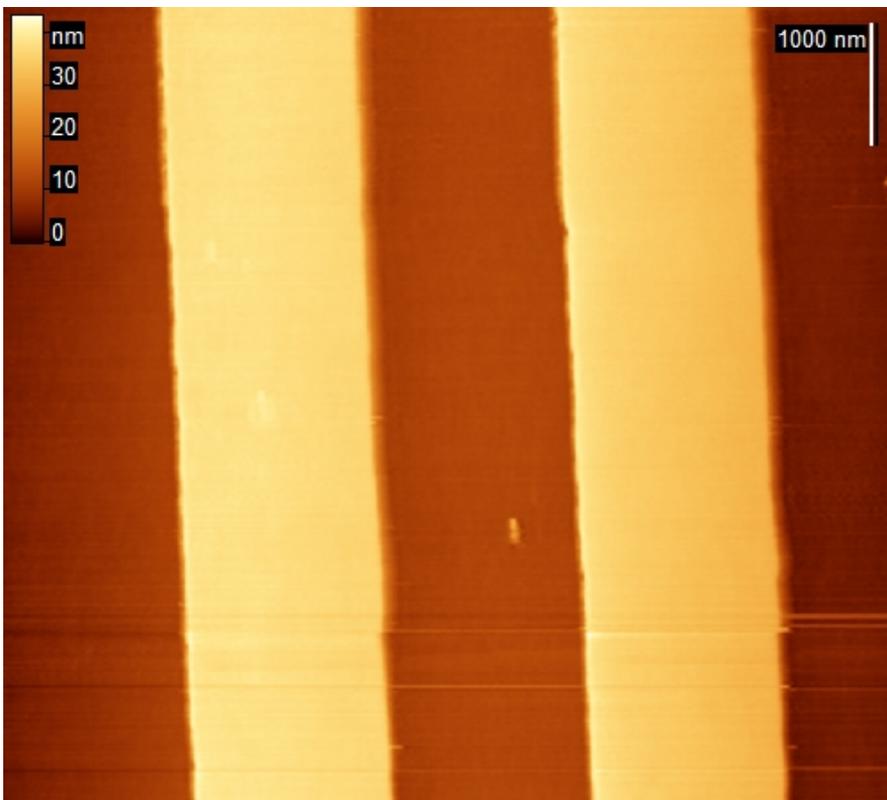


Ступень 1

Ступень 2

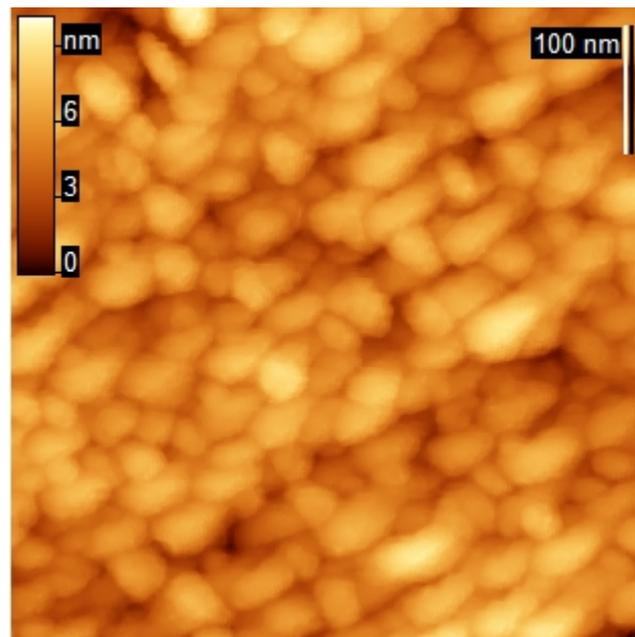


# Гистограмма высот, статистический анализ поверхности

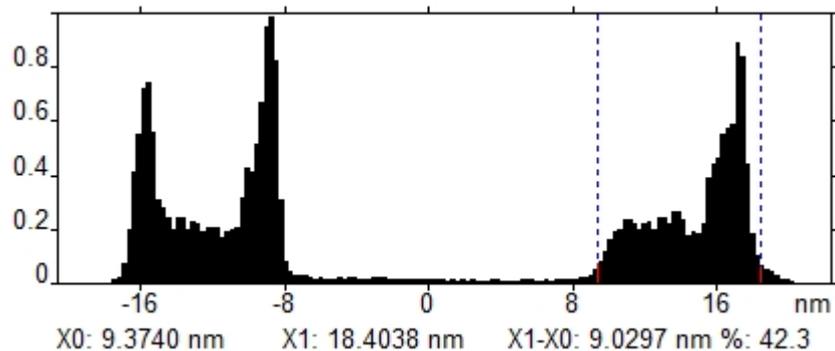


Средняя квадратичная шероховатость

$$\sigma = \sqrt{\langle (h(x, y) - \bar{h})^2 \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^L \sum_{y=1}^W (h(x, y) - \bar{h})^2}{LW}}$$



Гистограмма высот для изображения:



$$\sigma = 1.4 \text{ nm}$$

$$Z_{\max} = 4.9 \text{ nm}$$

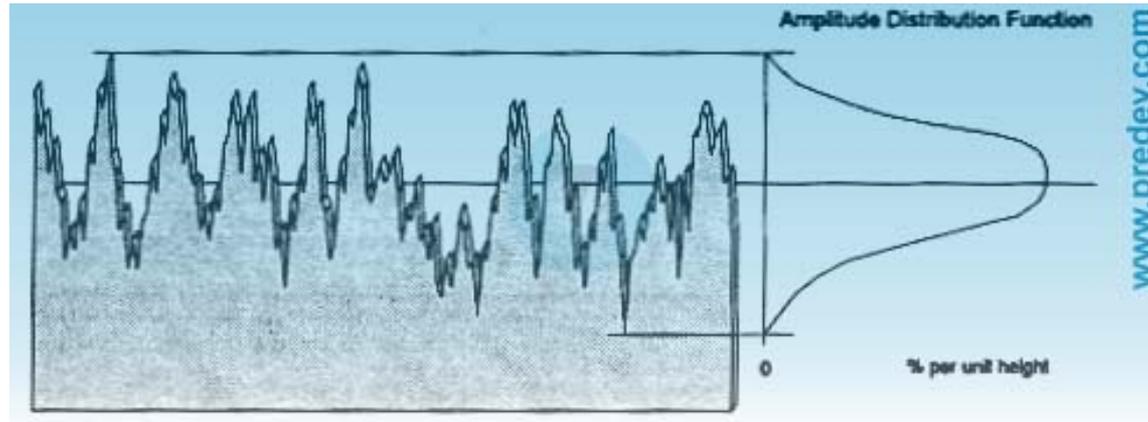
$$S_{\text{кадра}} = 0.249 \mu\text{m}^2$$

$$S_{\text{поверхности}} = 0.254 \mu\text{m}^2$$

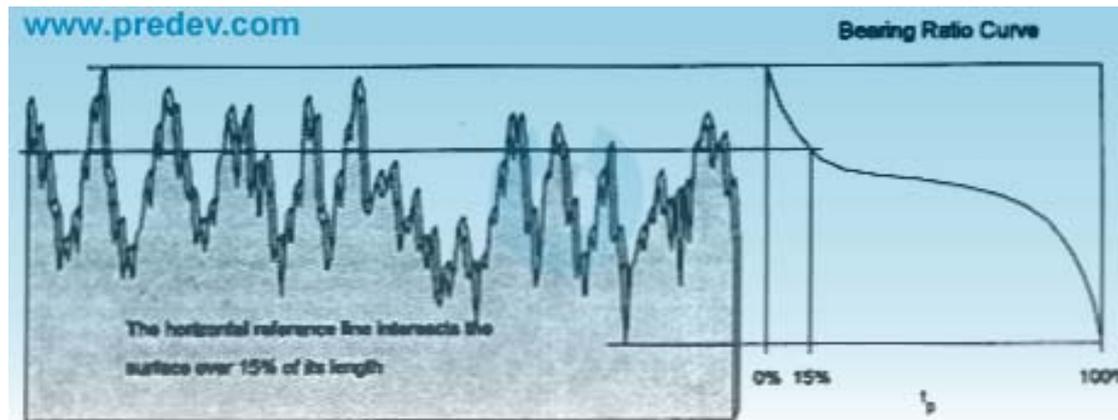
# Статистический анализ поверхности

Функция распределения вероятности для профиля поверхности:

$$\text{Prob}(z + dz > r(x) > z) = \text{ADF}(z)dz$$



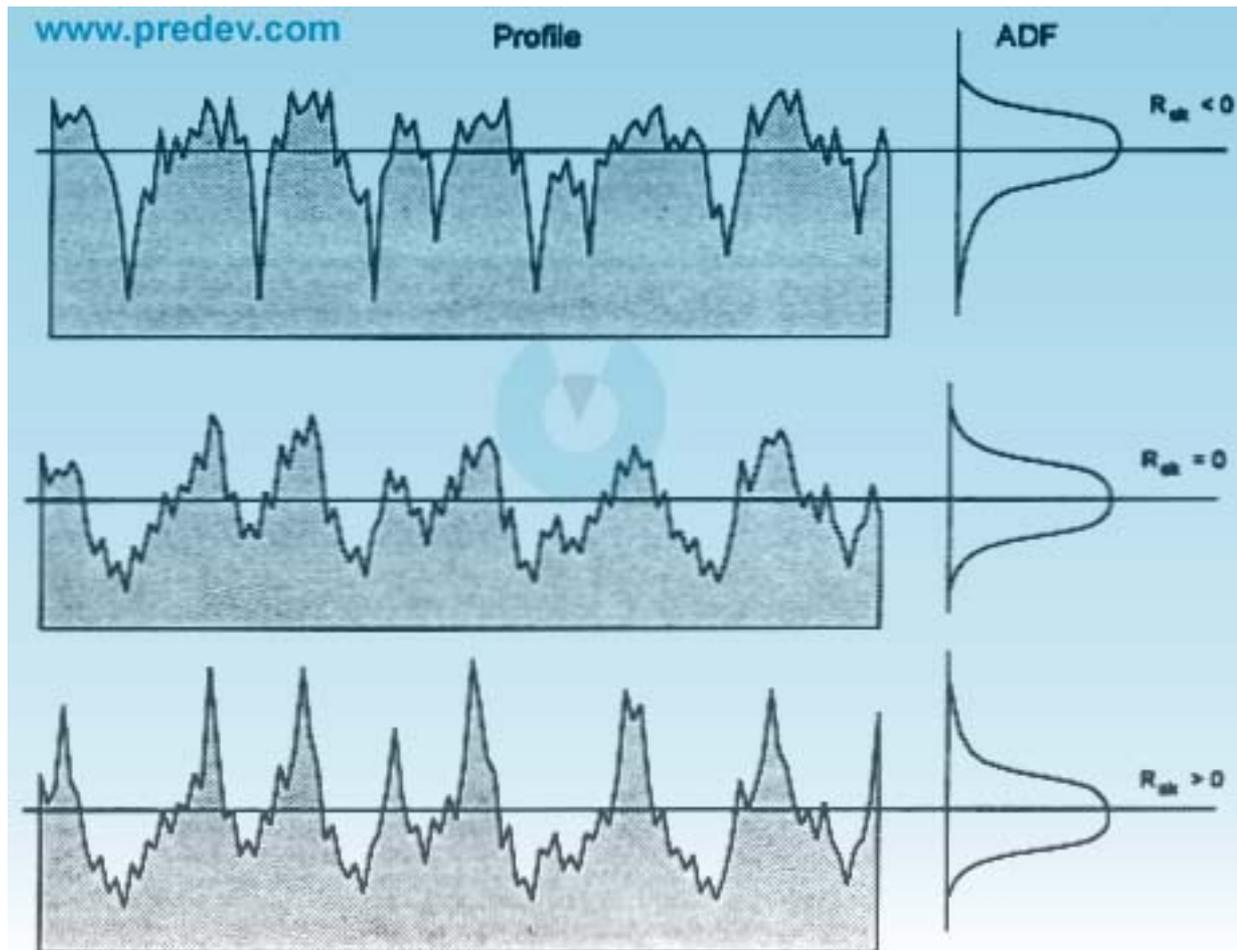
Кривая Абботта-Файерстоуна показывает, какая доля площади поверхности лежит выше заданной высоты:



# Статистический анализ поверхности

Параметр асимметрии

$$R_{sk} = \frac{1}{NR_g^3} \sum_{n=1}^N r_n^3$$



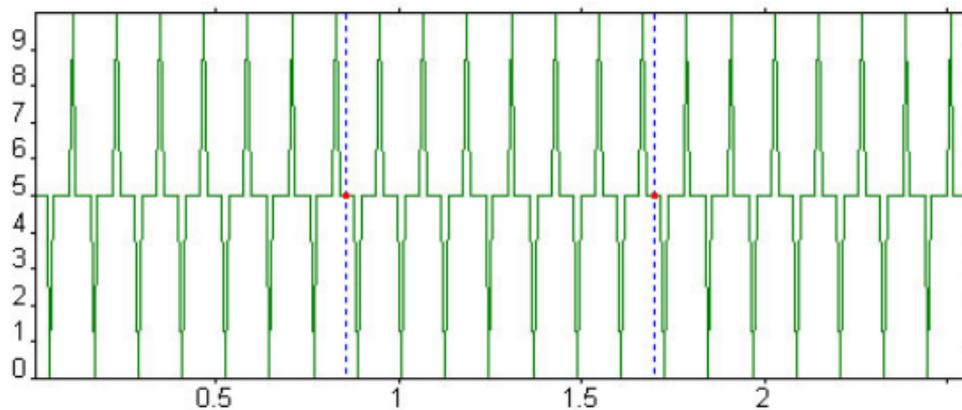
# Статистический анализ поверхности: амплитудные параметры

Мера эксцесса

$$R_{ku} = \frac{1}{NR_q^4} \sum_{n=1}^N r_n^4$$

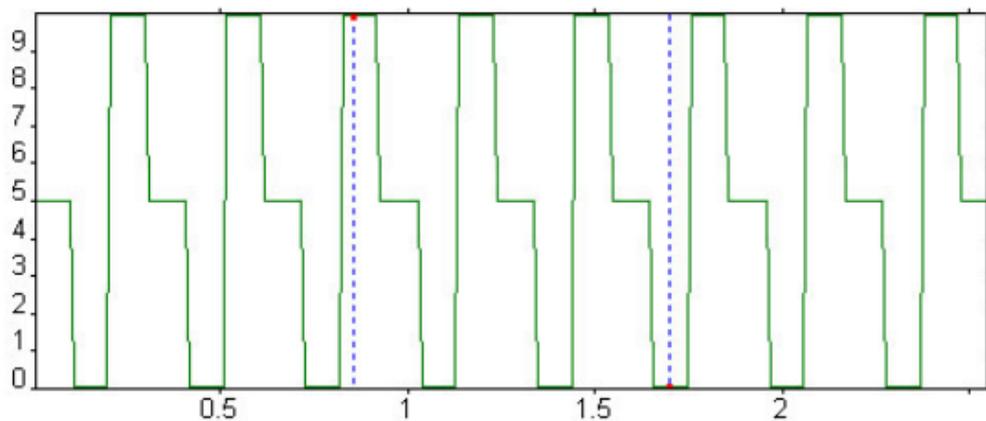
Характеризует отклонение от гауссовой формы функции распределения вероятности для профиля поверхности.

Для гауссовой формы  $R_{ku} = 3$ .



Узкие пики и впадины

$$R_{ku} = 6.07$$

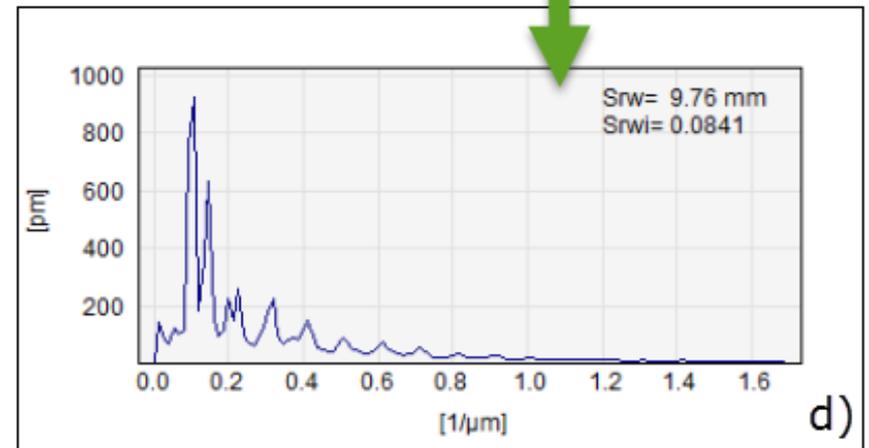
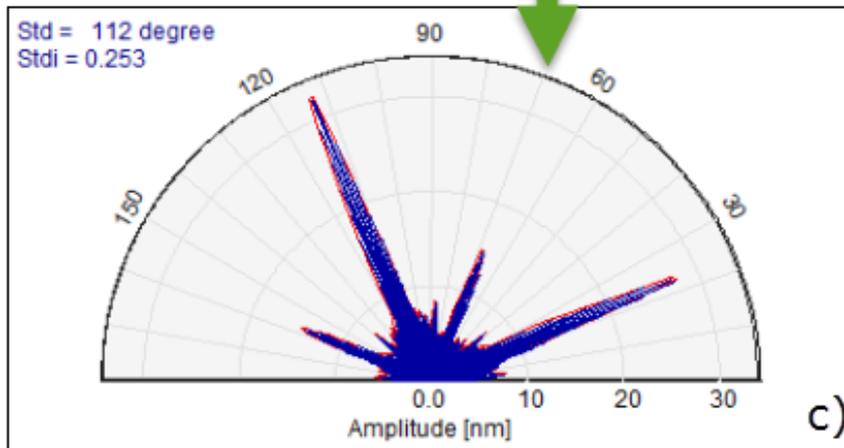
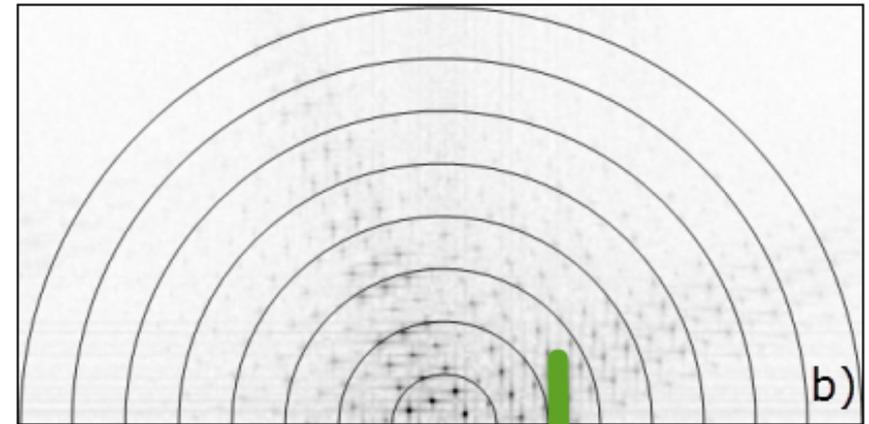
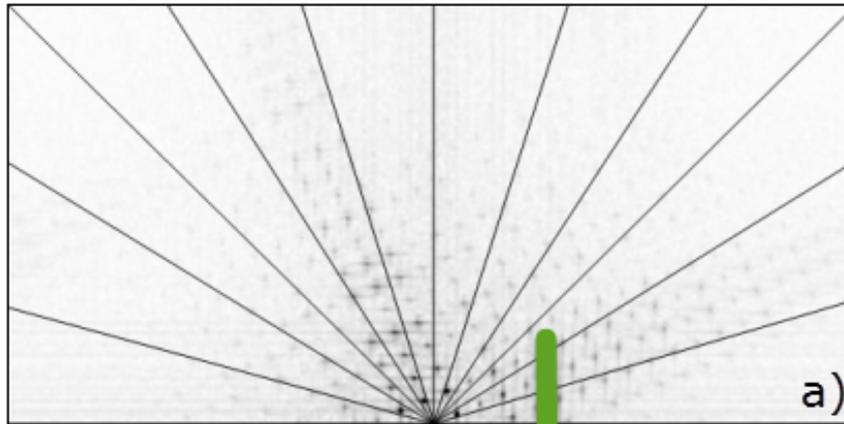


Широкие пики и впадины

$$R_{ku} = 1.6$$

# Статистический анализ: пространственные параметры

Пространственные параметры рассчитываются на основе Фурье-образа



$S_{td}$  — направление текстуры;  $S_{tdi}$  — индекс направления текстуры ( $A_{td\_aver} / A_{td\_max}$ )

$S_{rw}$  — доминирующая длина волны;  $S_{rwi}$  — индекс доминирующей длины волны

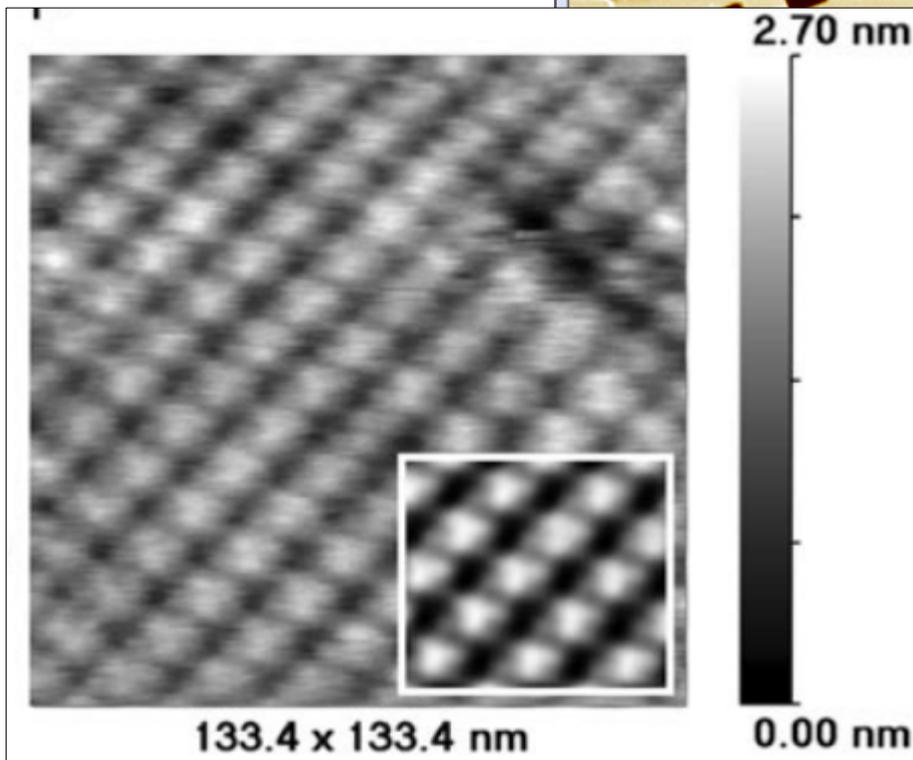
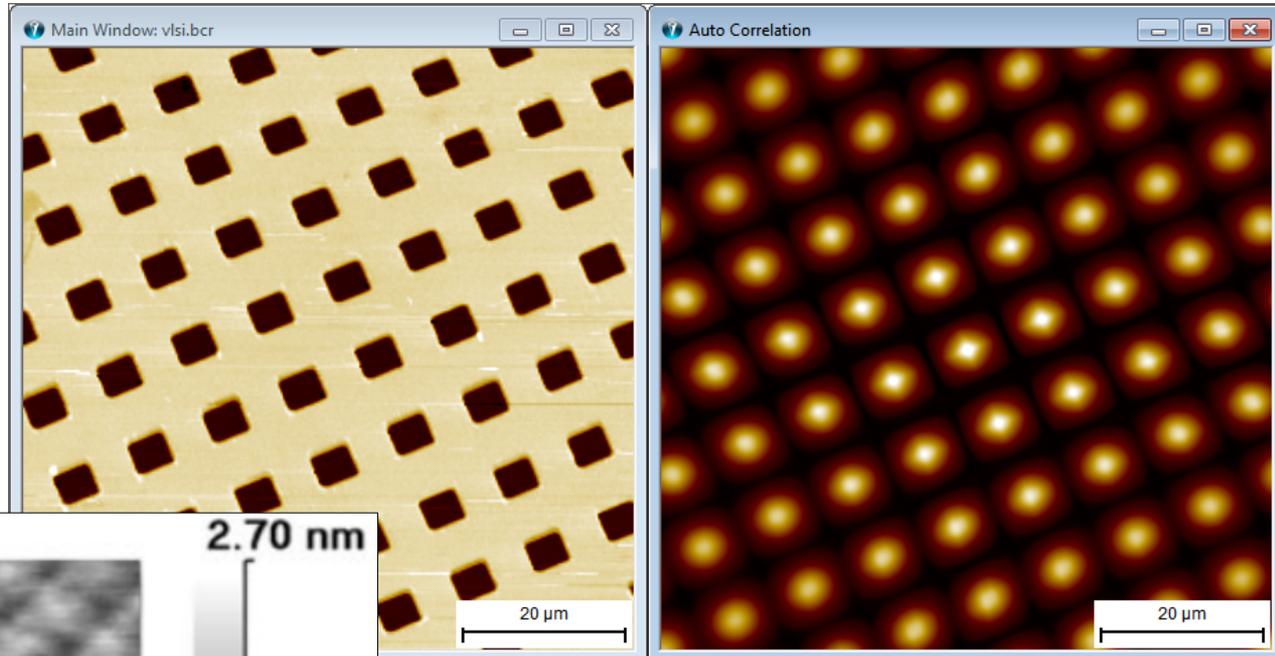
Для изотропной поверхности без доминирующей волны индексы равны 1.

<http://www.imagemet.com>

# Корреляционное усреднение

Пример автокорреляции

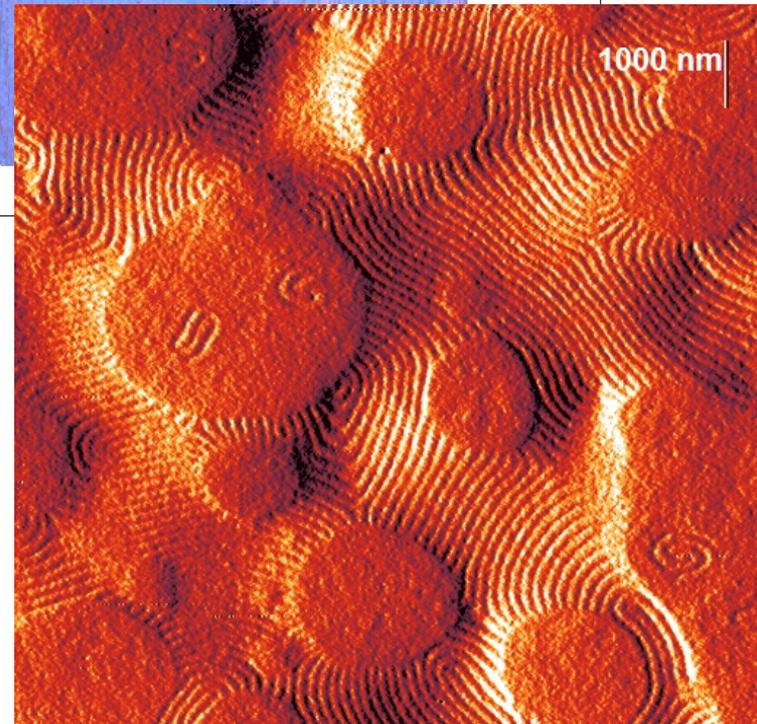
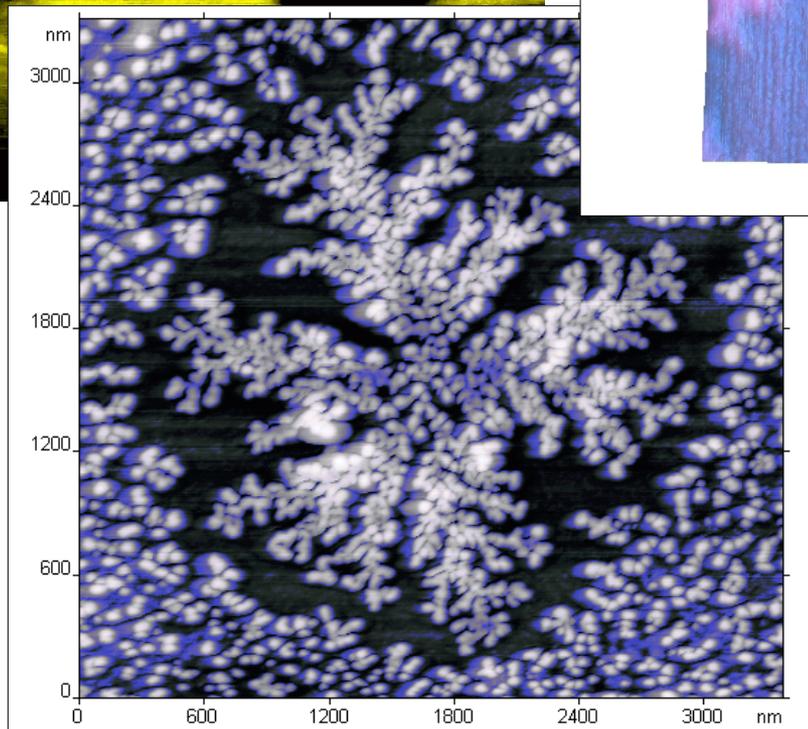
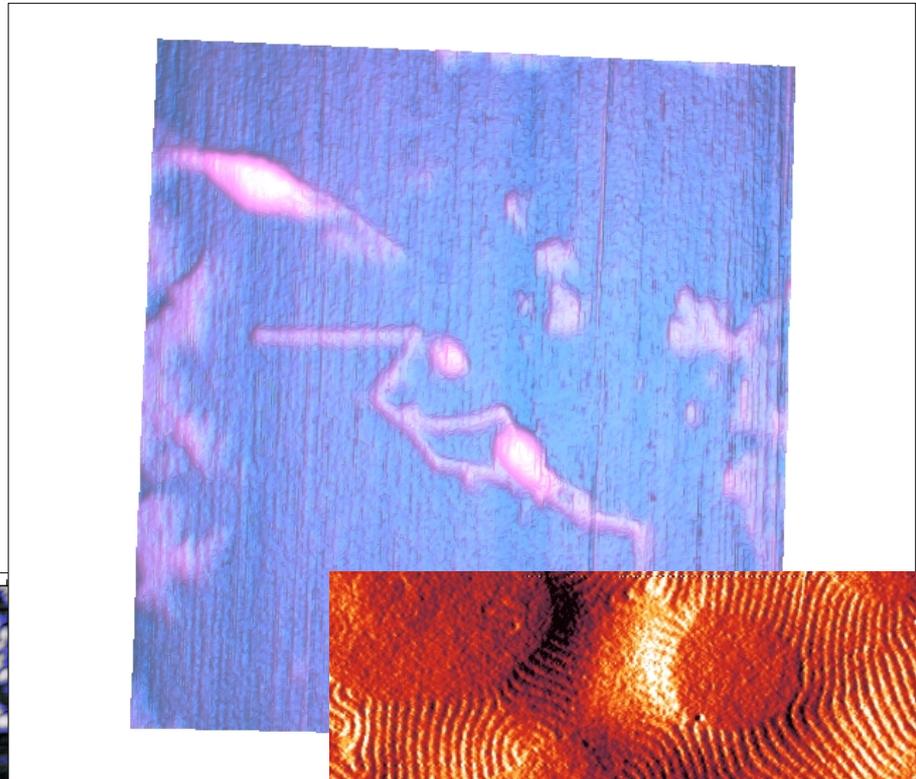
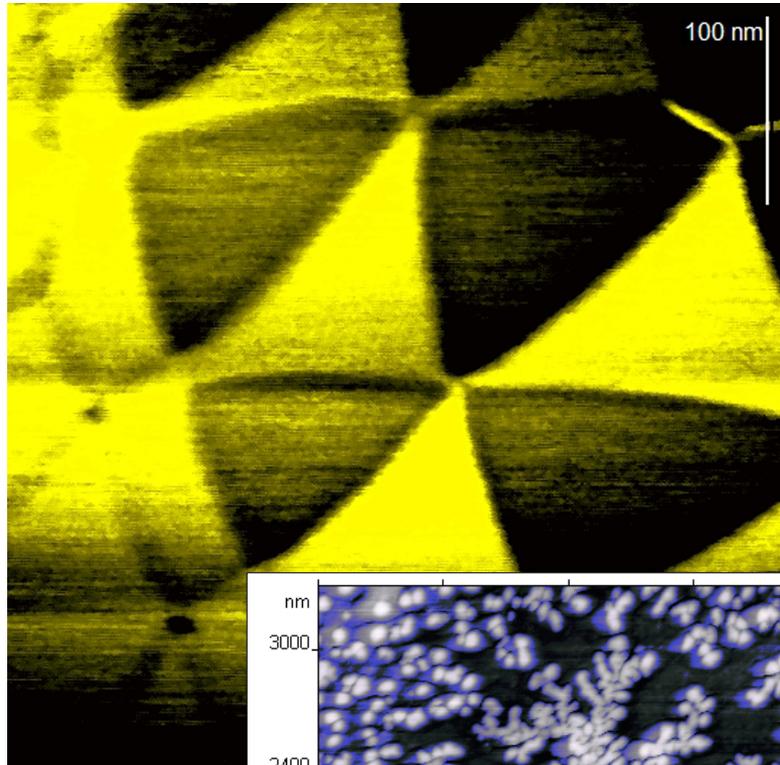
<http://www.imagemet.com>



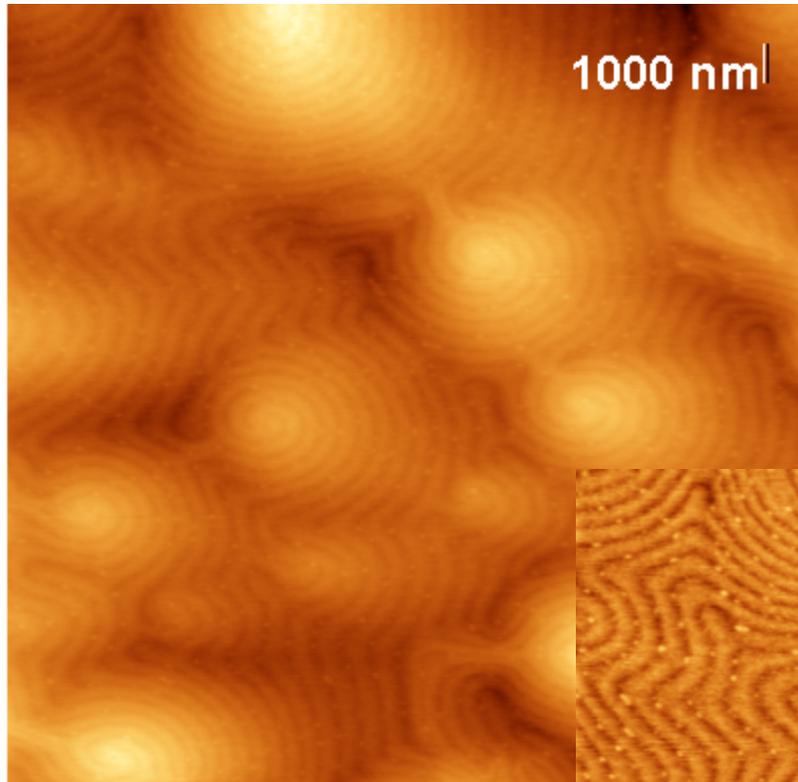
Уточнение структуры молекул  
белка в 2D-кристалле на слюде

A.I. Shevchuk, G.I. Frolenkov,  
D. Snchez et al. *Angew. Chem. Int.*  
Ed. 2006, 45, 2212 –2216

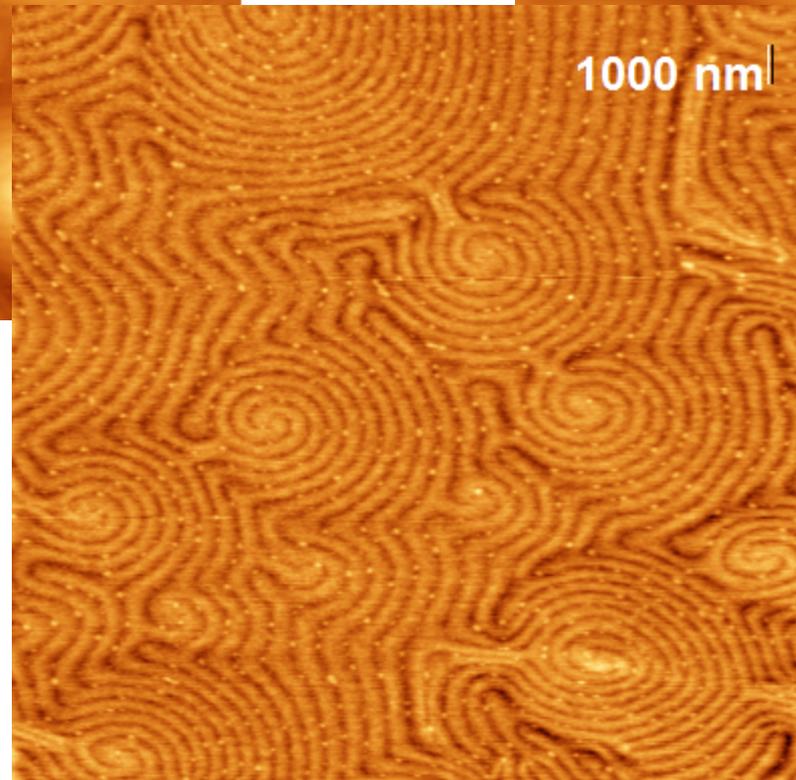
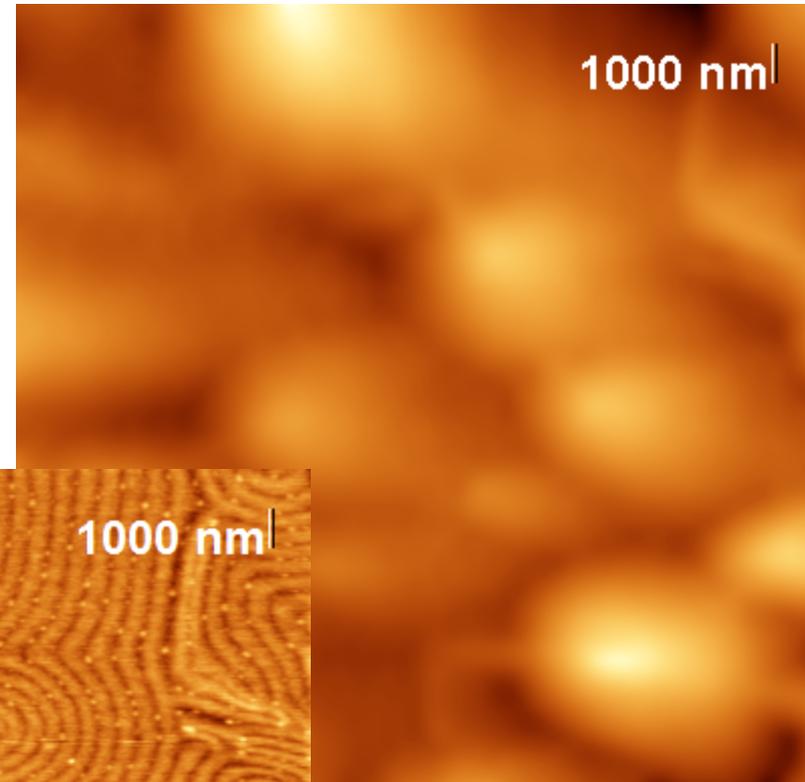
# Многообразие палитр



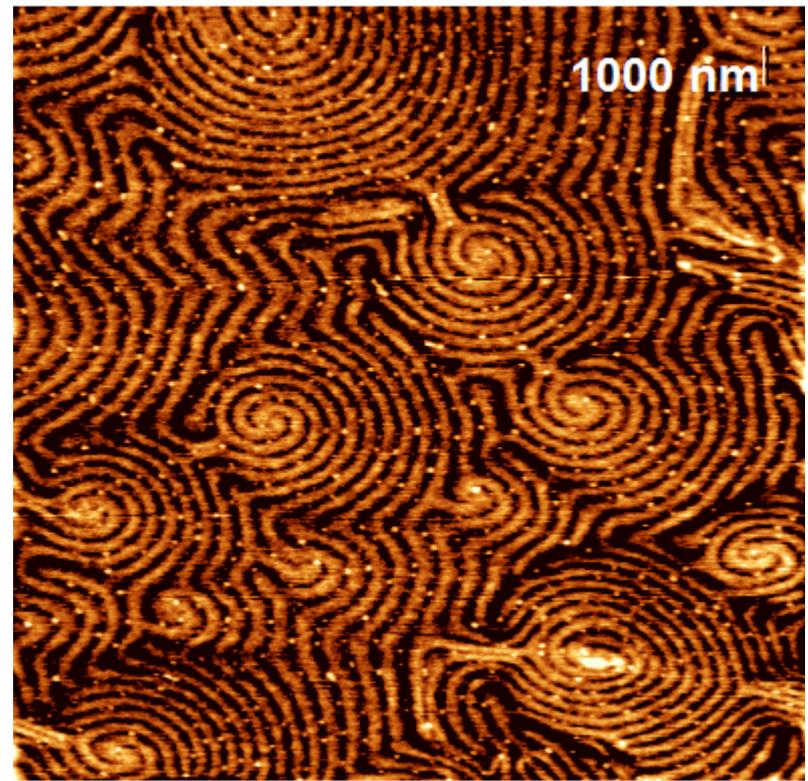
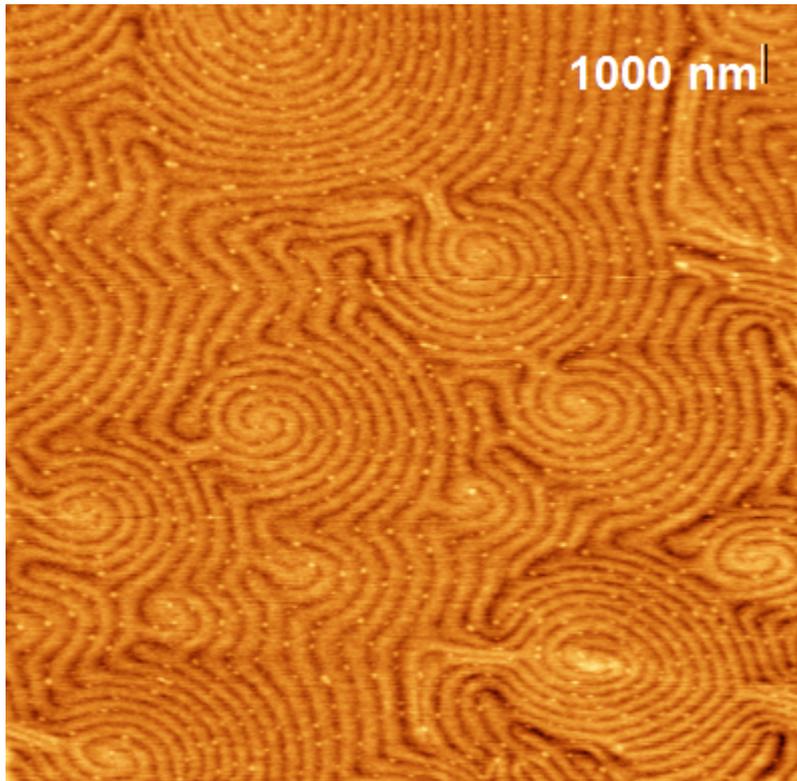
# Вычитание сплайна поверхности



Сплайн  
8x8



# Подстройка цветовой шкалы



# Как одновременно увидеть и крупные, и мелкие детали

Бактерия *E-coli*

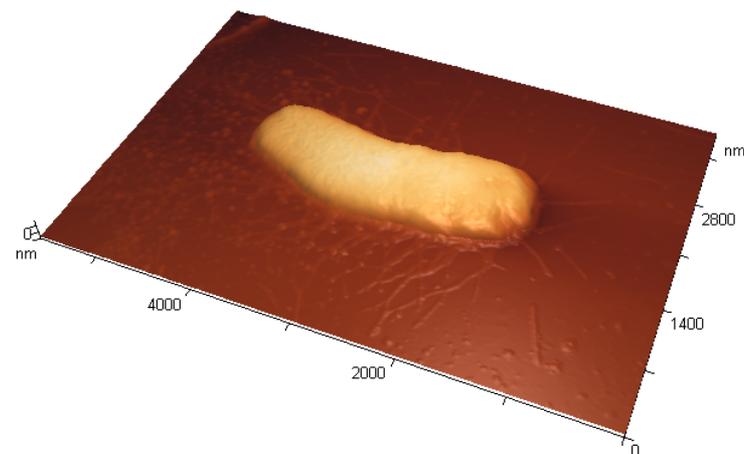


Градиентный фильтр

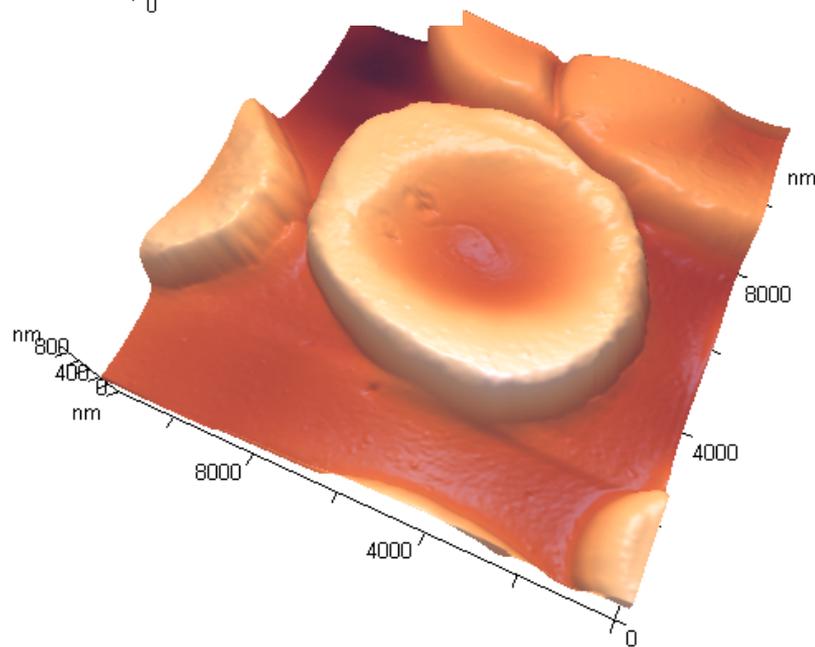
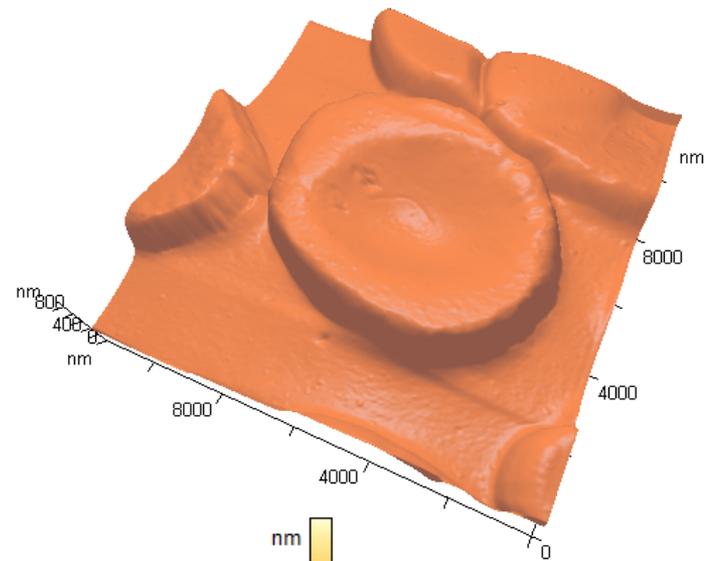
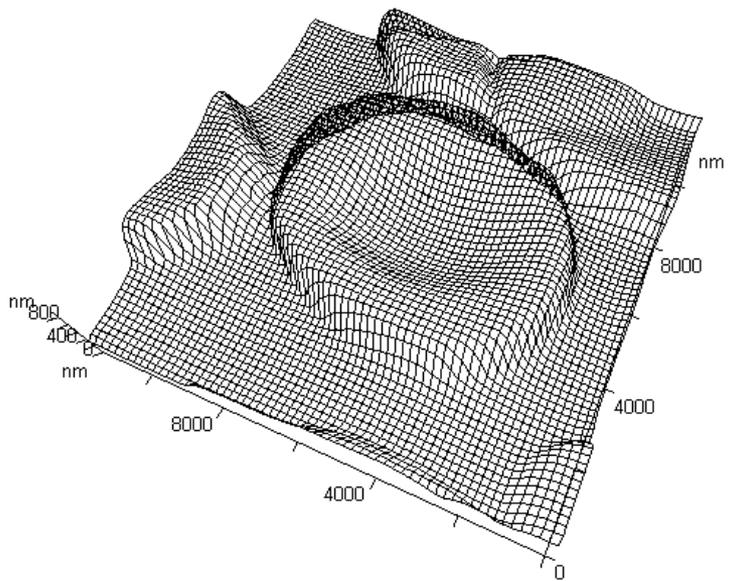
Подсветка сбоку



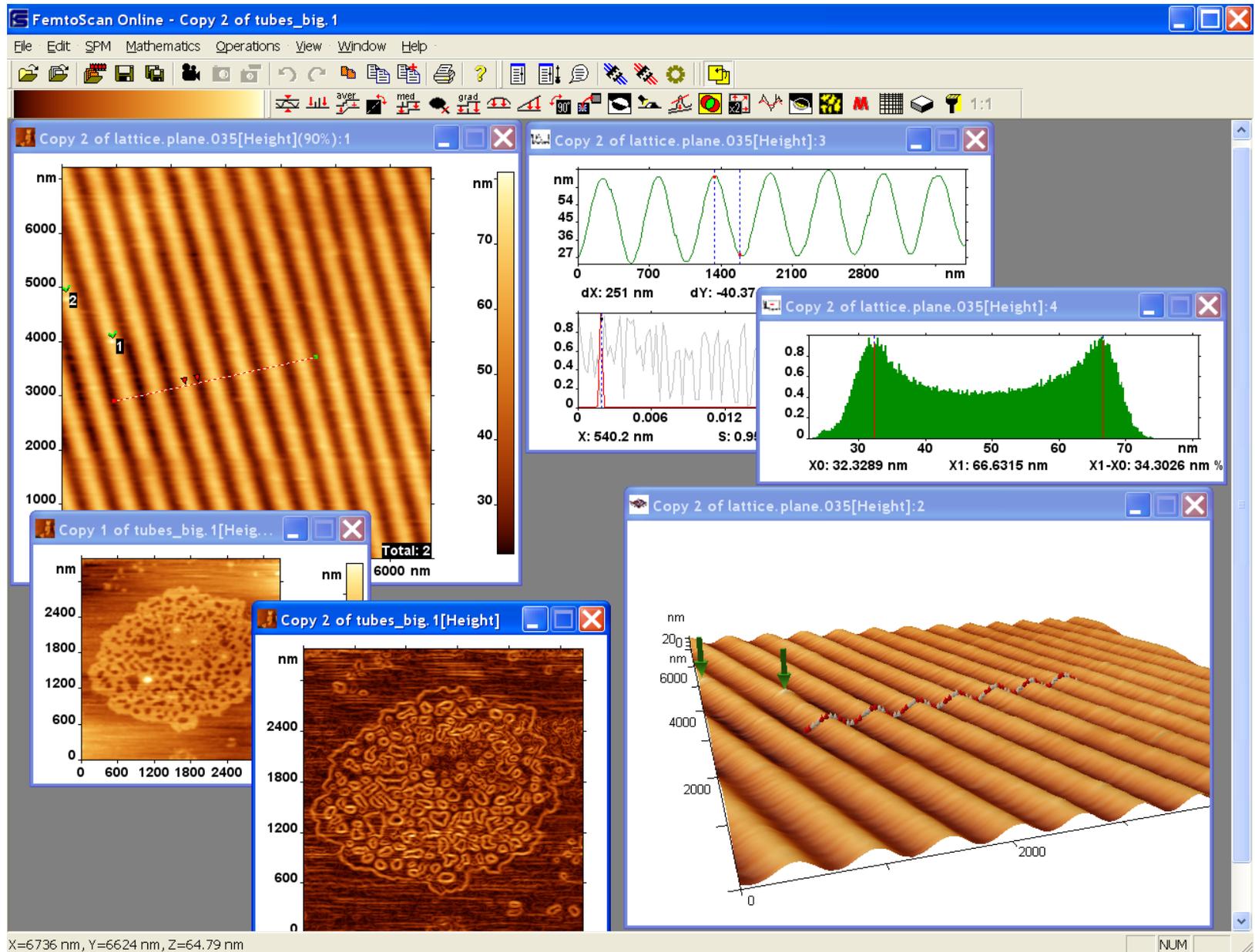
3D - изображение



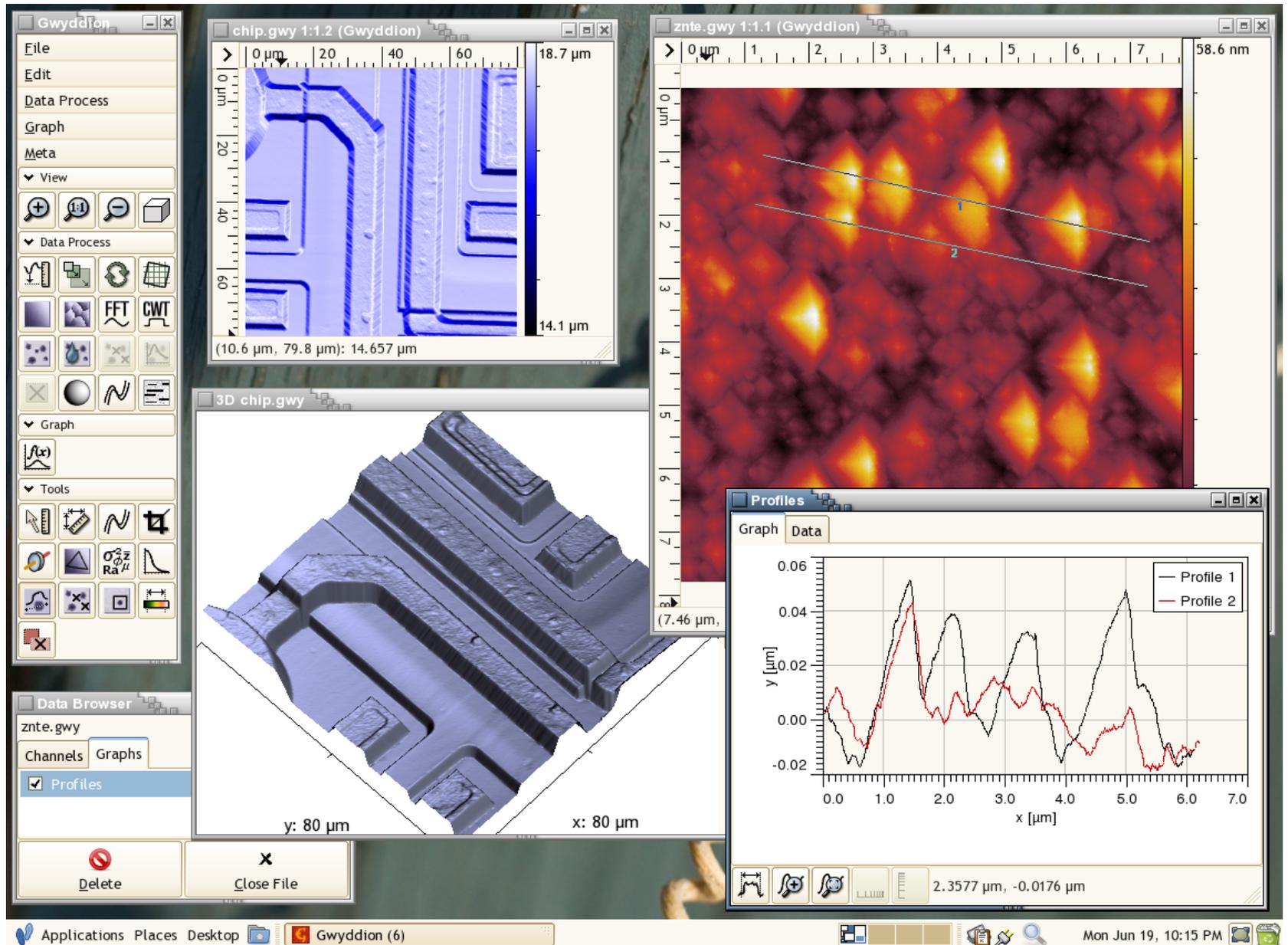
# 3D - изображения



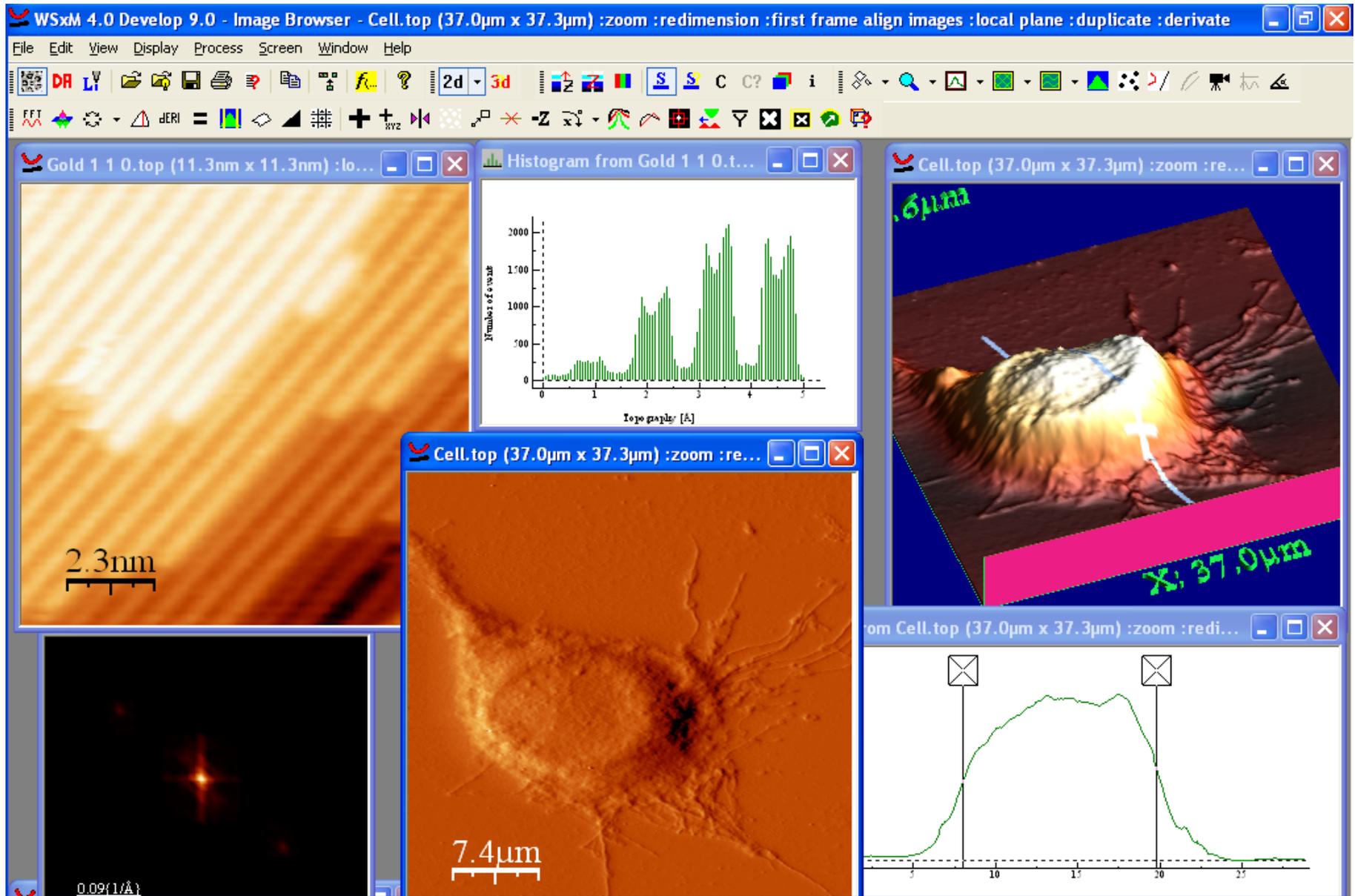
# FemtoScan



# Gwyddion



# WSxM



## Домашнее задание к лекции

**Выберите одну из программ для обработки изображений:**

FemtoScanOnline ([femtoscanonline.com](http://femtoscanonline.com))

Gwyddion ([gwyddion.net](http://gwyddion.net))

WSxM ([wsxmsolutions.com](http://wsxmsolutions.com))

любую другую, специализированную для СЗМ

**Выберите одно из изображений для работы:**

HOPG - высокоориентированный пиролиитический графит

NaCl - кристаллы соли на слюде

SilGreen - пленка холестерина

TMV - вирус табачной мозаики на слюде

**Подготовьте это изображение для публикации (представьте его в наглядном и красивом виде)**

**Измерьте объекты на этом изображении:**

HOPG - высоту ступеней

NaCl - размеры частиц (длина, ширина, высота)

SilGreen - период спирального рельефа

TMV - размеры частиц (длина, ширина, высота)

**Подготовьте отчет, который должен содержать изображения, результаты измерений и краткое описание, как все это было получено**

**Спасибо за внимание!**