

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

Зондовая микроскопия: методы, теория, приложения

Лекция 4.

Обработка изображений

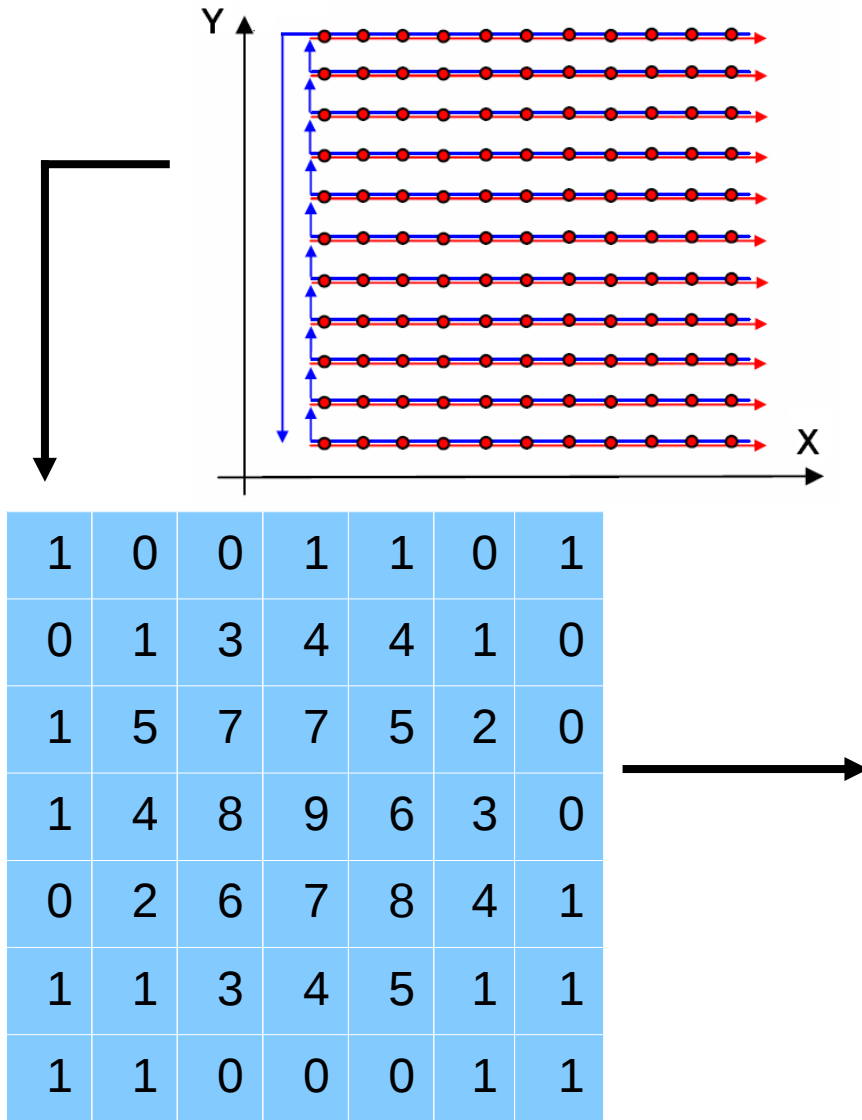
О.В. Синицына, Г.Б. Мешков, Я.В. Гиндикин

12 марта 2018

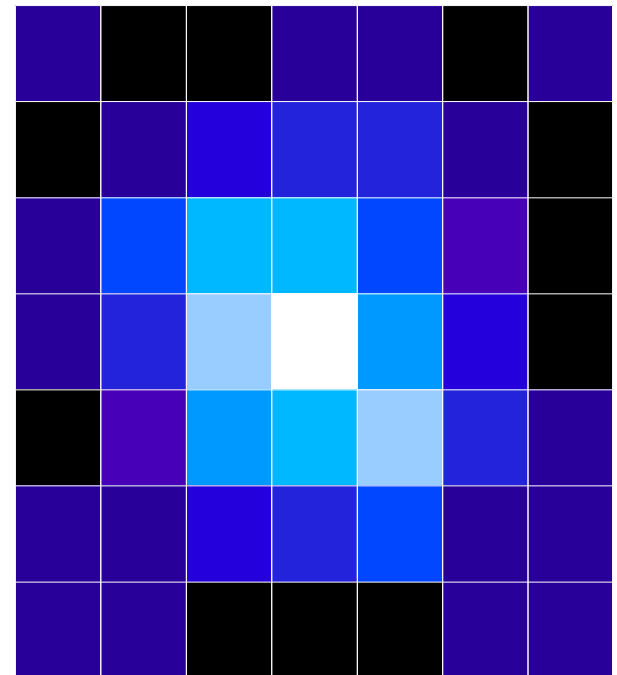
- Обработка изображений СЗМ
- Анализ данных
- Представление результатов

Обработка изображений СЗМ

Задача обработки изображений — исключение артефактов, связанных с процессом измерения

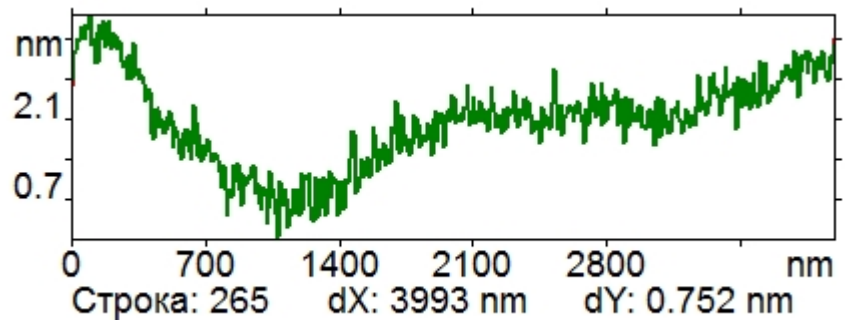
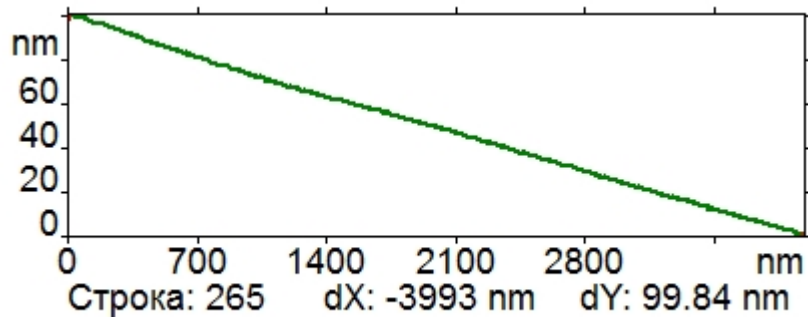
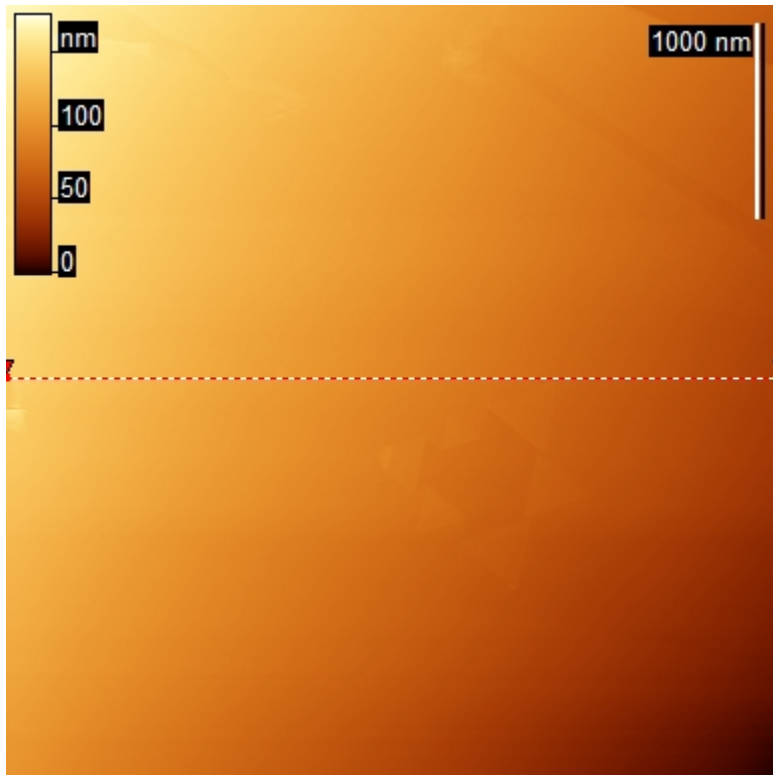


Наиболее распространённый размер кадра в СЗМ: 512x512 точек



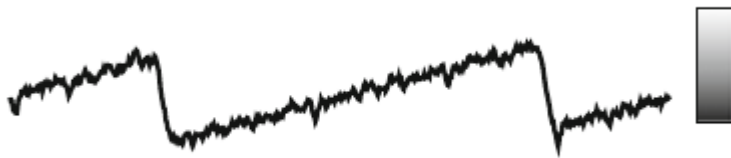
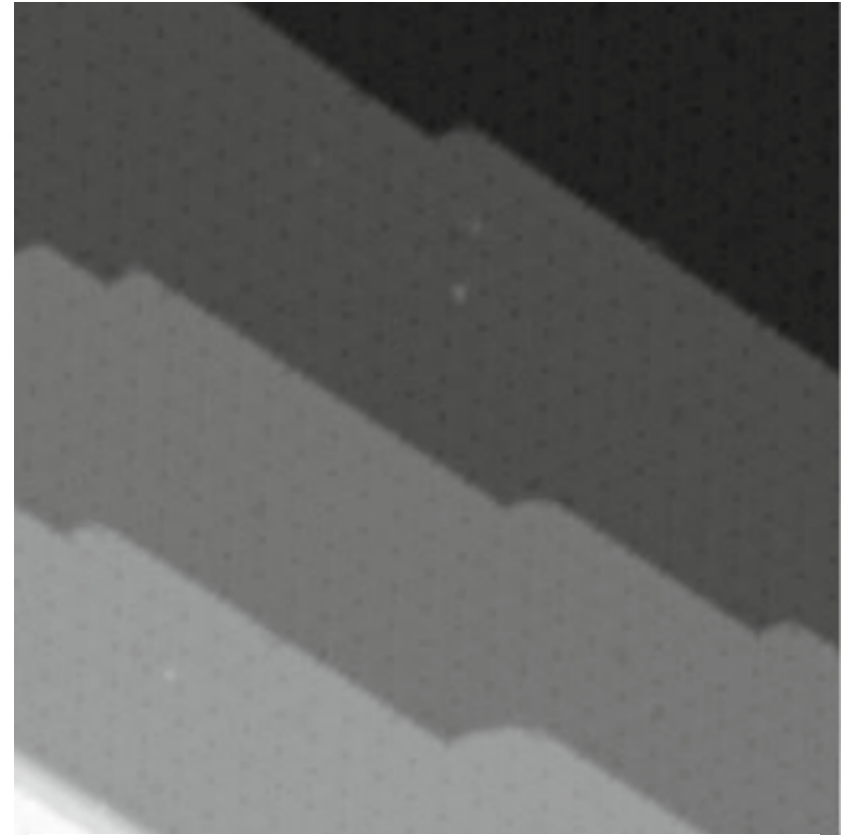
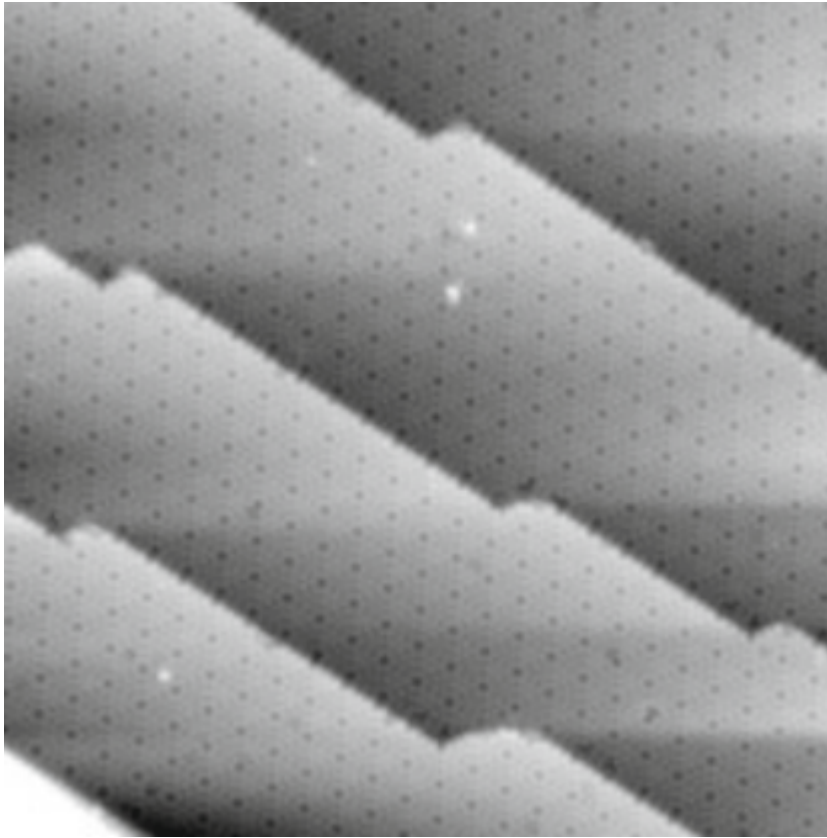
Удаление наклона

Макроскопический наклон плоскости образца на угол 1.4°



Удаление наклона

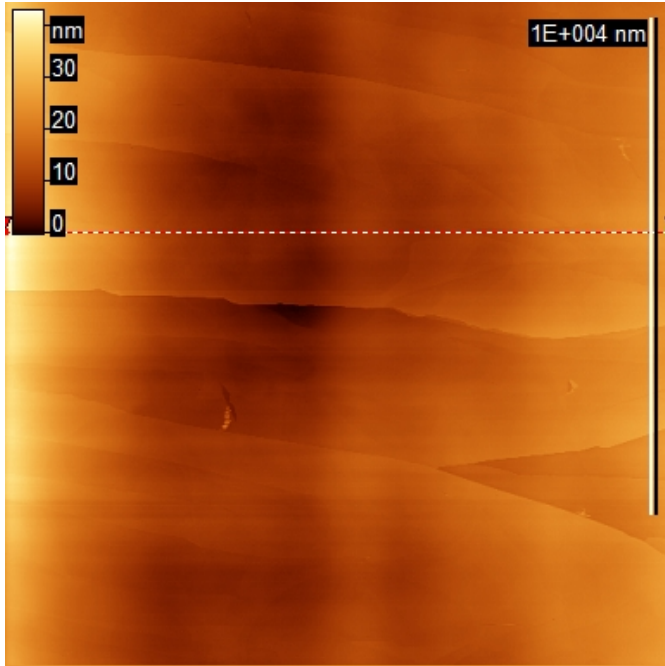
Удаляя одни артефакты, не создайте новых!



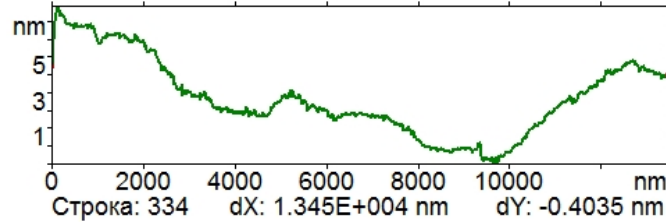
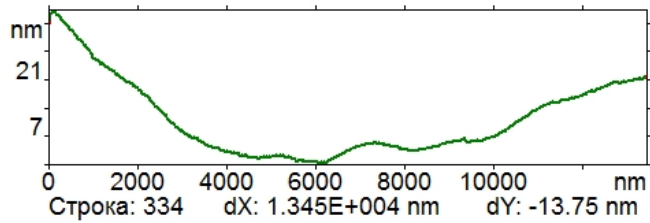
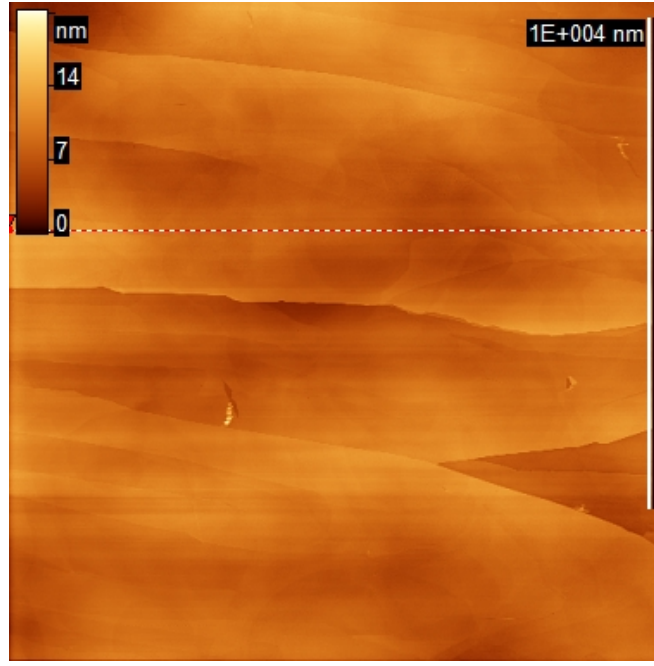
Изображения заимствованы из книги В. Voigtlaender. Scanning Probe Microscopy. Atomic Force Microscopy and Scanning Tunneling Microscopy. Springer-Verlag, Berlin, 2015

Вычитание поверхностей высших порядков

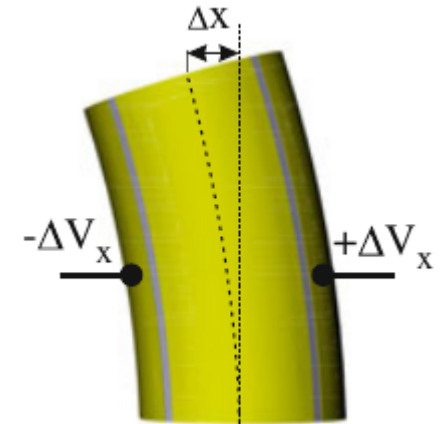
До вычитания фона



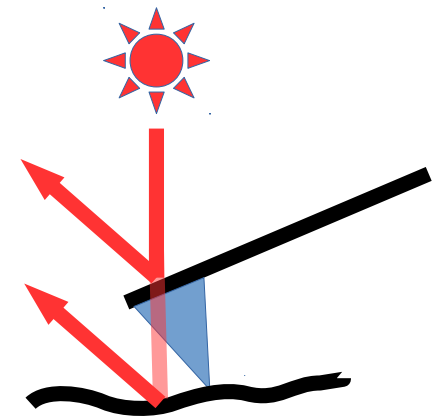
После вычитания фона



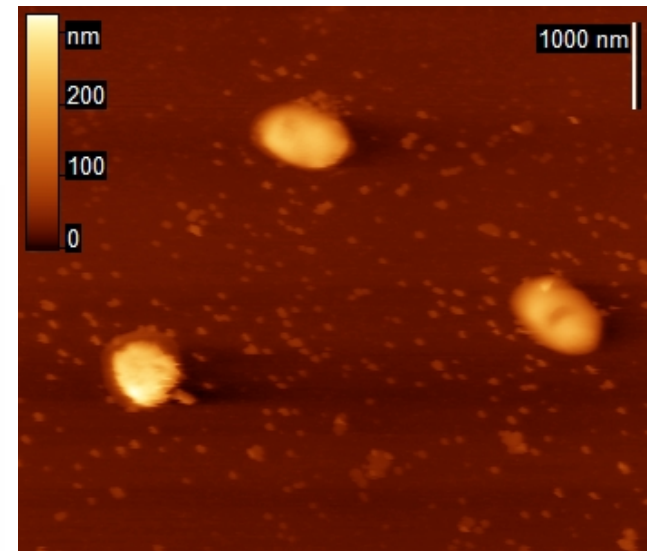
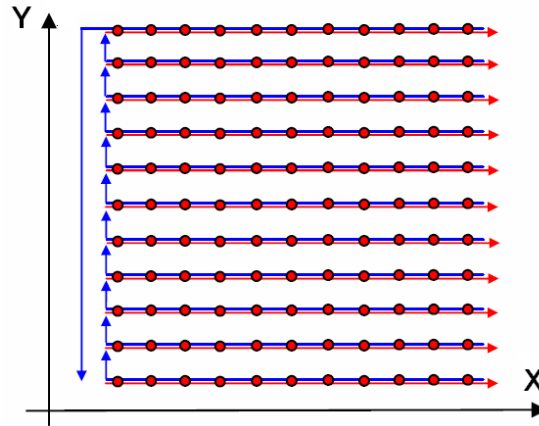
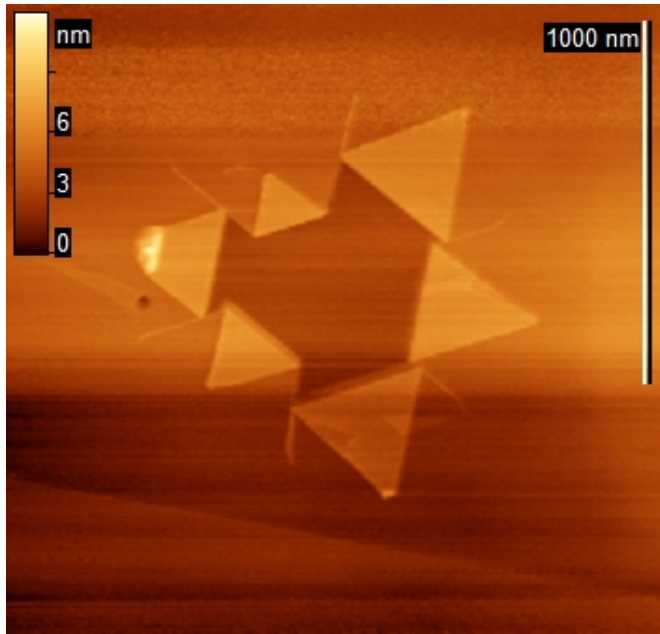
Коррекция движения
пьезотрубки



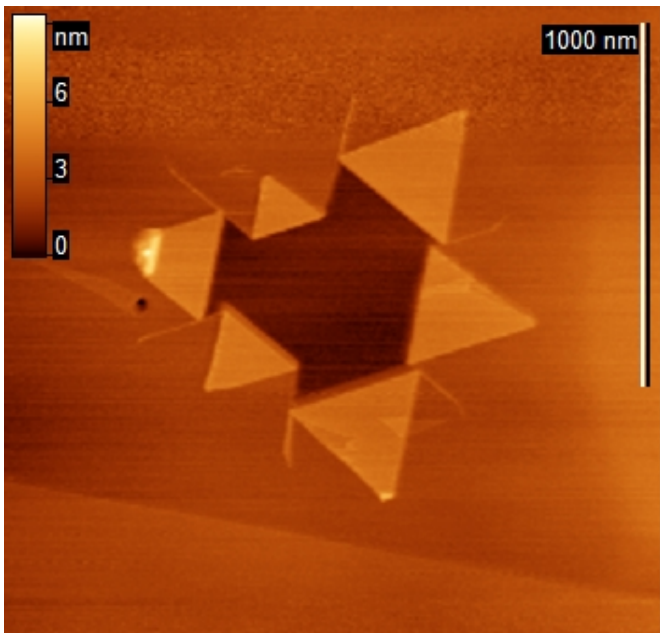
Коррекция
интерференции в АСМ



Усреднение по строкам

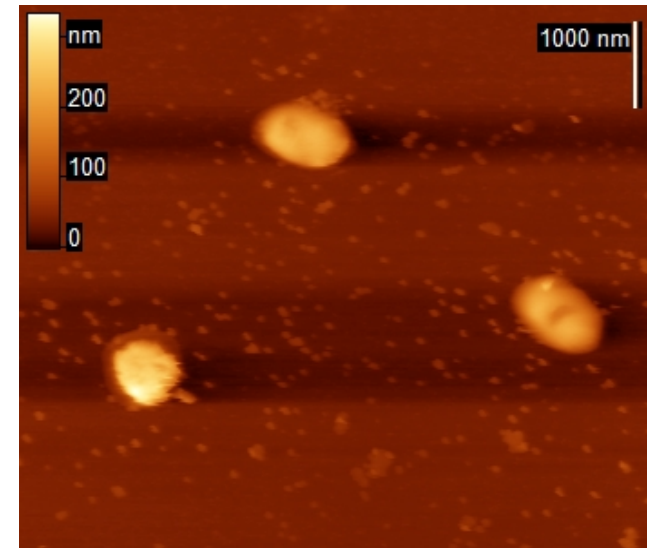


Области, содержащие
высокие объекты,
должны исключаться

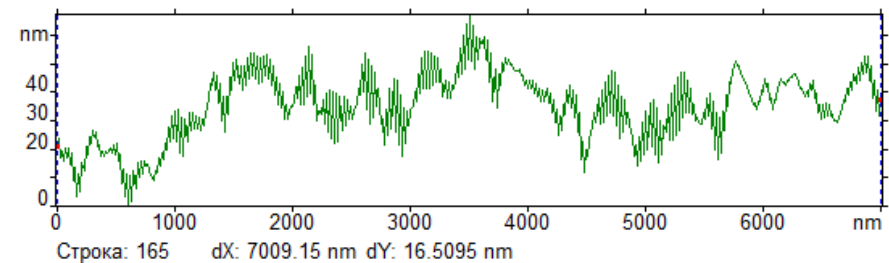
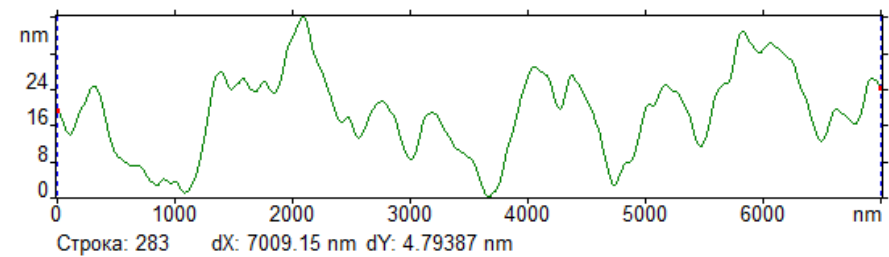
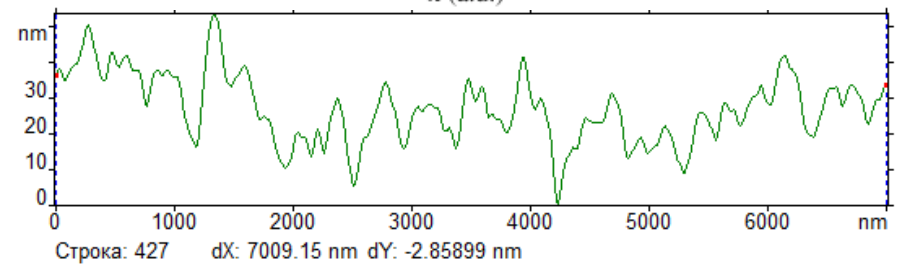
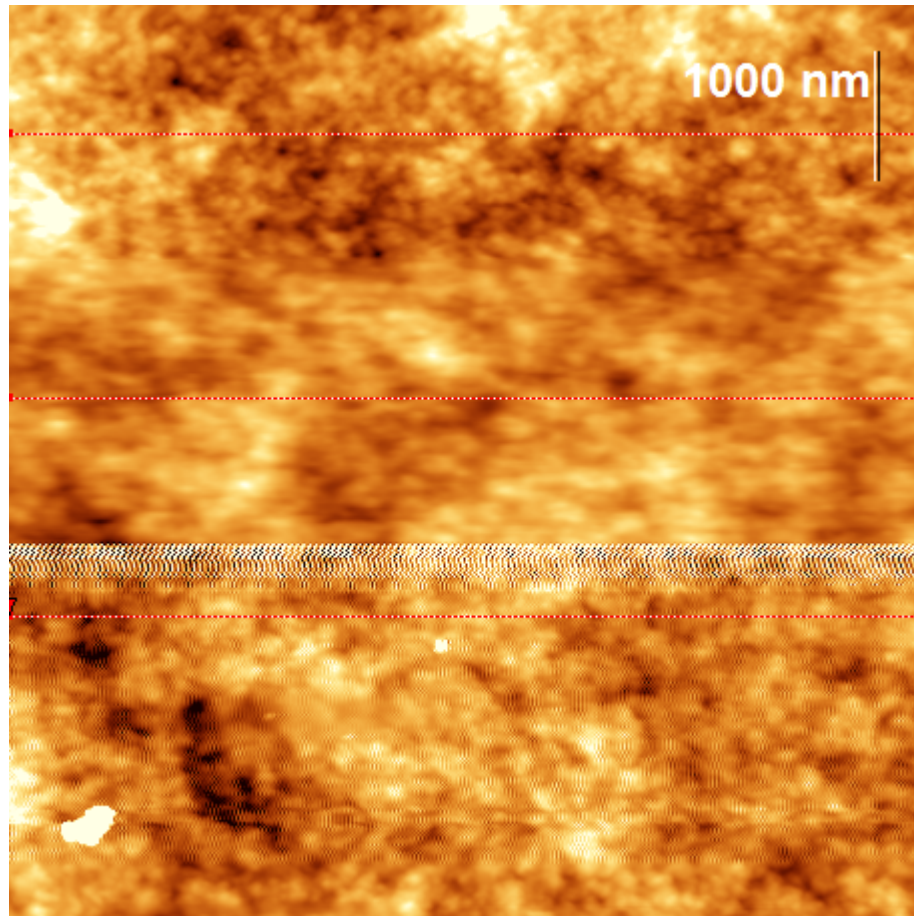
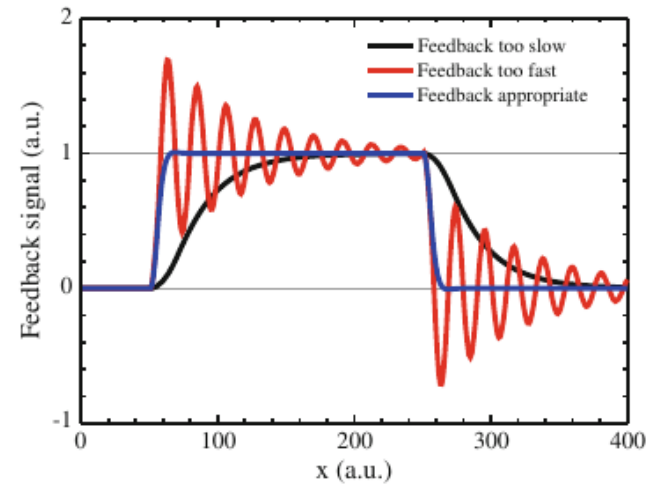


X — быстрая строка
Y — медленная строка

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



Работа обратной связи и вид изображения



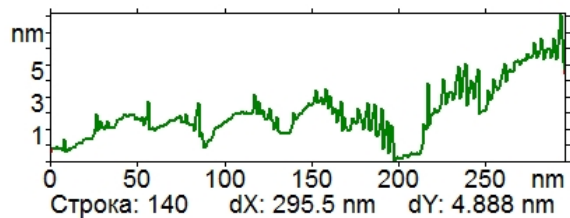
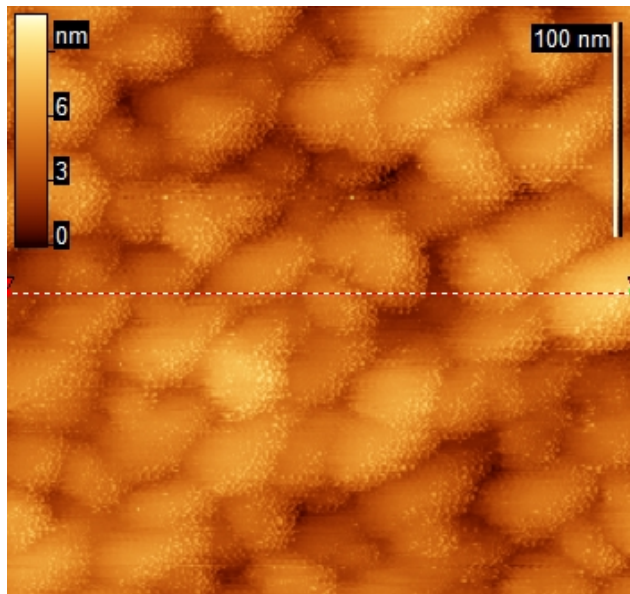
Устранение шумов. Усреднение

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

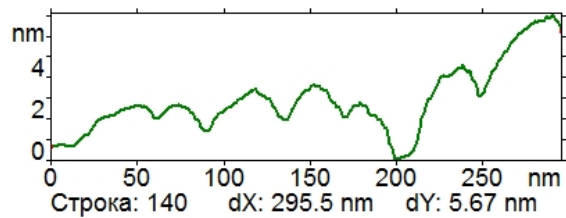
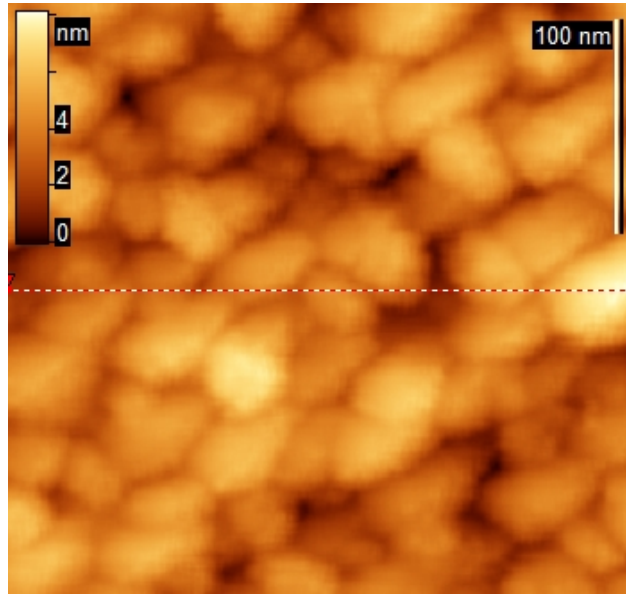
- Выбирается размер окна (в примере 3x3, черная рамка)
- В окне считается среднее значение и присваивается центральной ячейке (выделена красным)
- На границах для работы фильтра требуется расширение изображения, например путем «отражения» (серые ячейки)

Устранение шумов. Усреднение

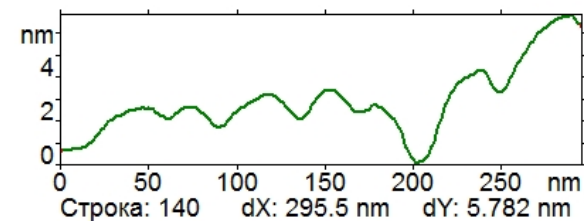
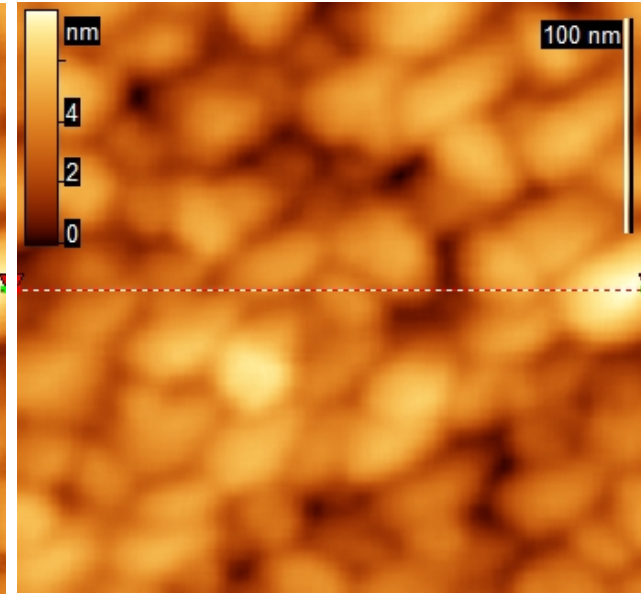
Исходное изображение



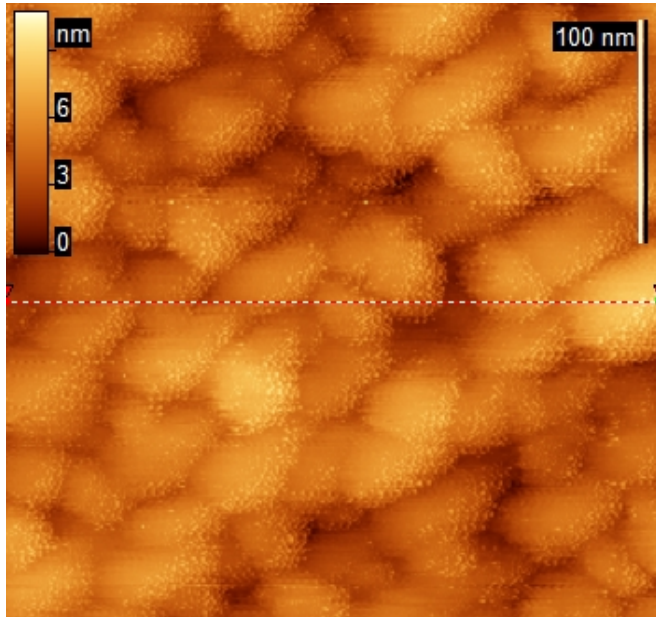
Усреднение
Окно 5x5



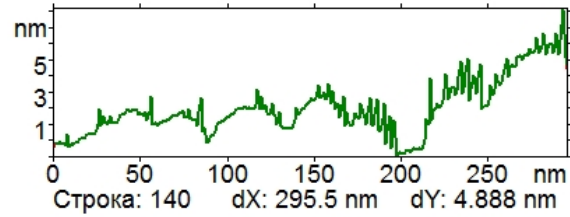
Усреднение
Окно 9x9



Устранение шумов. Медианная фильтрация

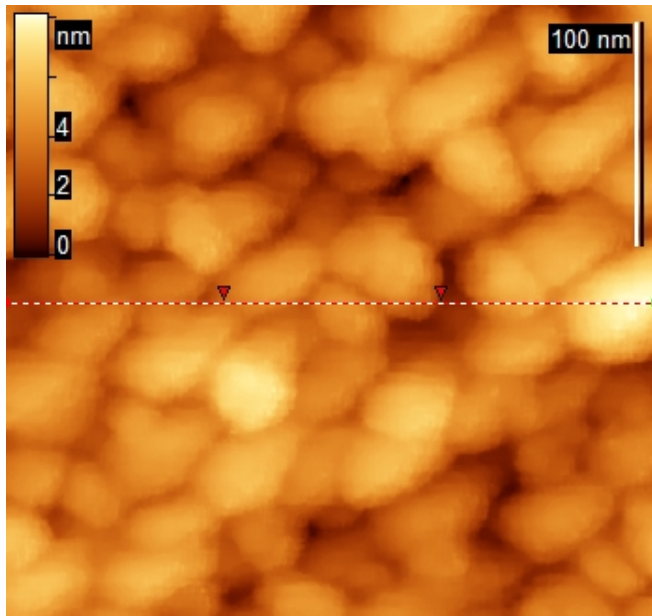


Исходное изображение

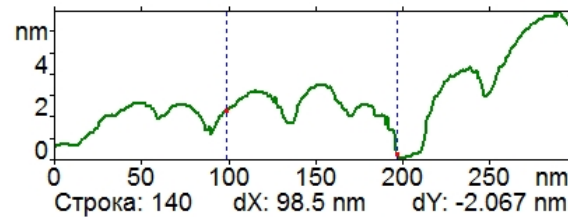


1	0	1
1	9	1
2	1	2

0 1 1 1 1 1 2 2 9



Медианный фильтр
Окно 5x5



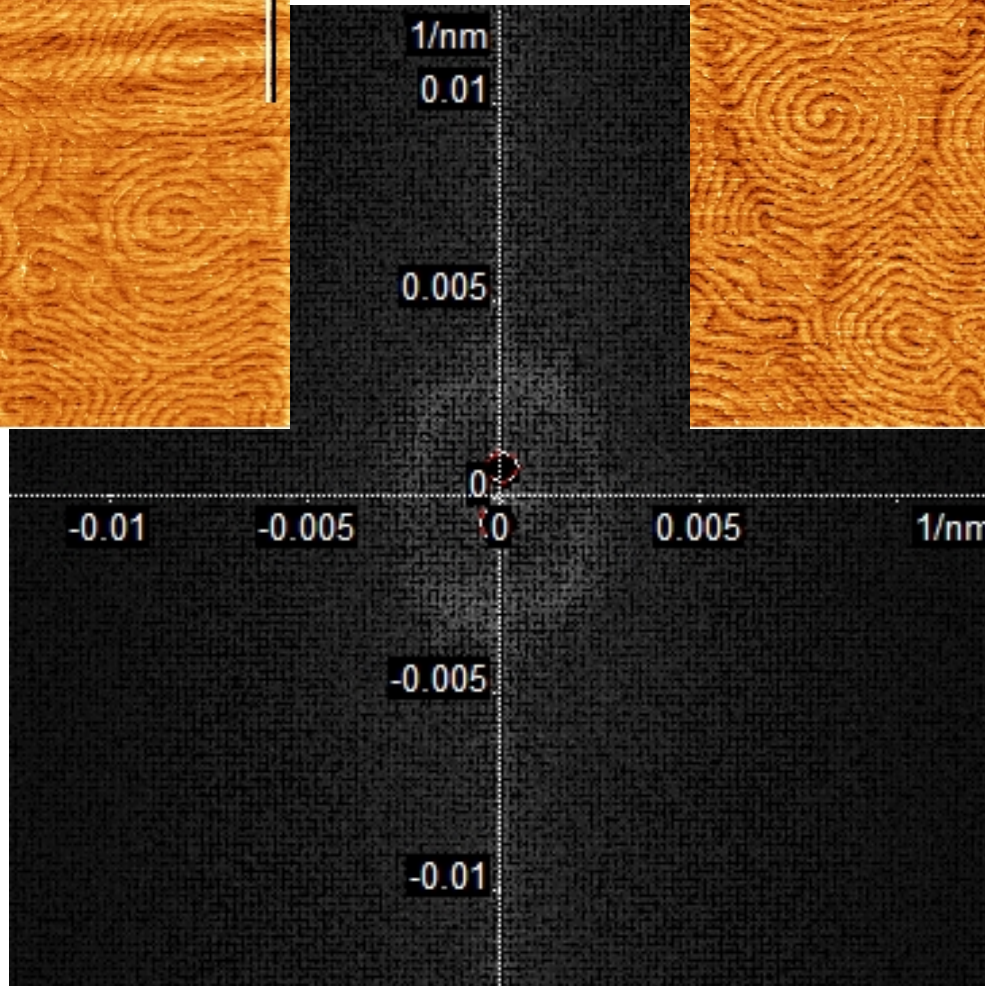
Медианное значение 1

Среднее значение 2

Фурье - фильтрация



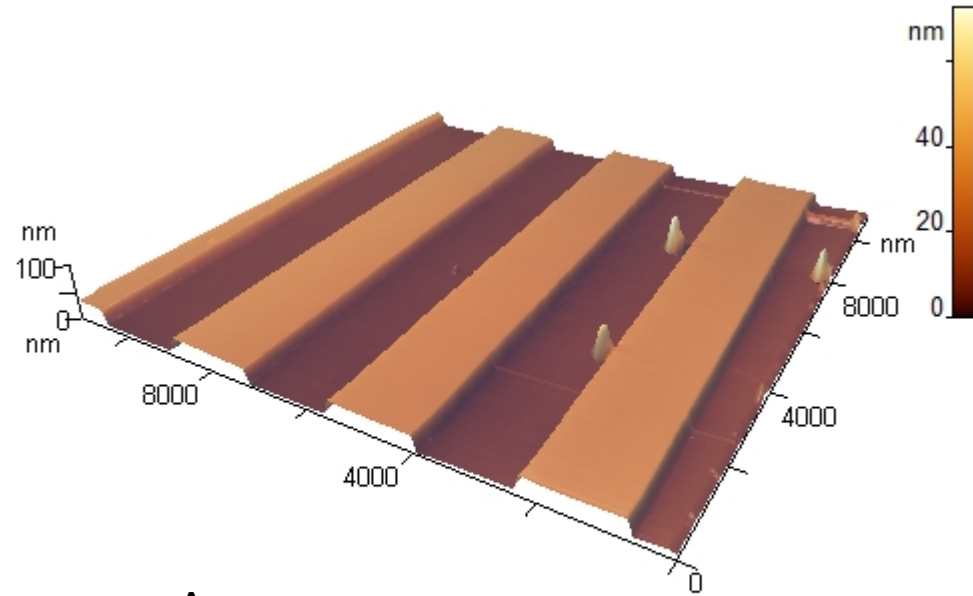
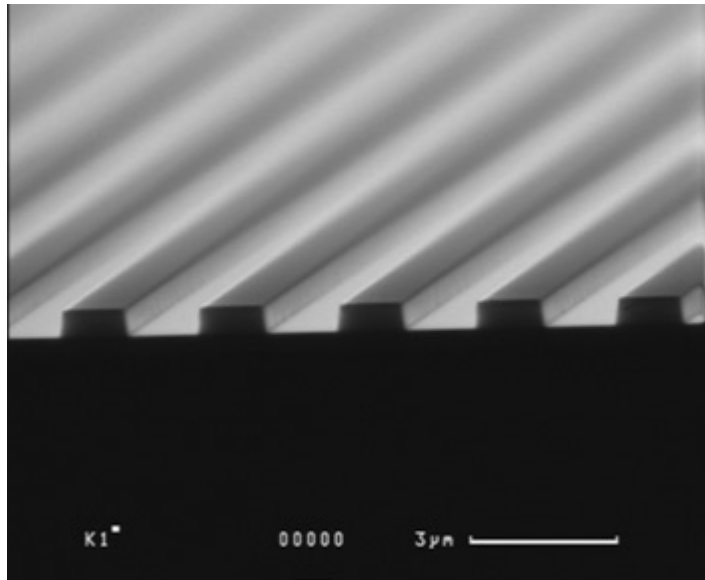
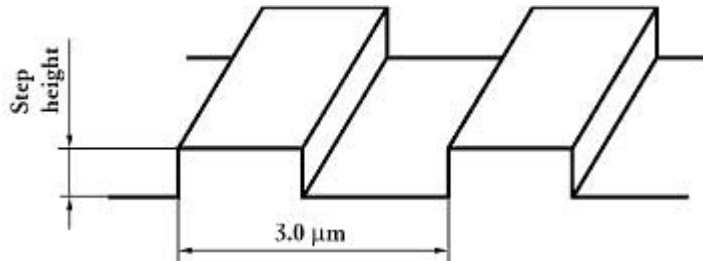
Исходное изображение



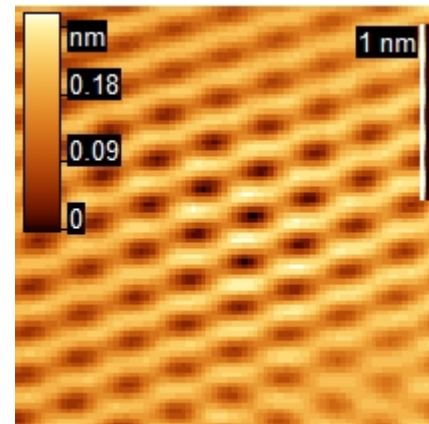
После фильтрации

Калибровка сканера

Калибровочная
решетка из TGZ1

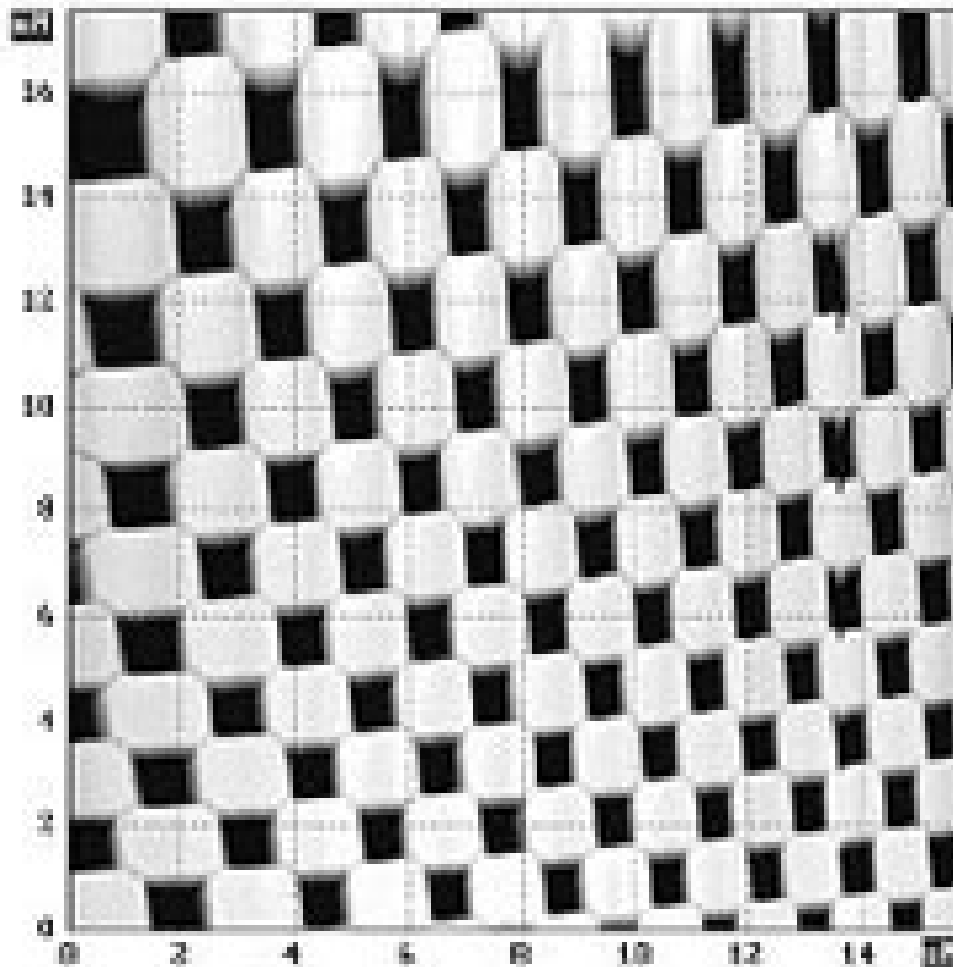


Атомные решетки для
калибровки
Атомы на графите (СТМ):



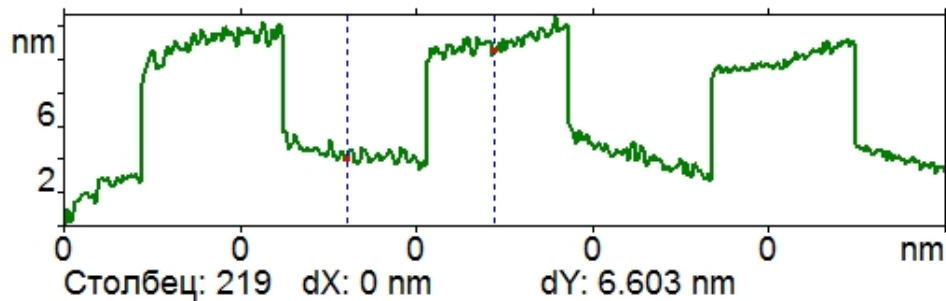
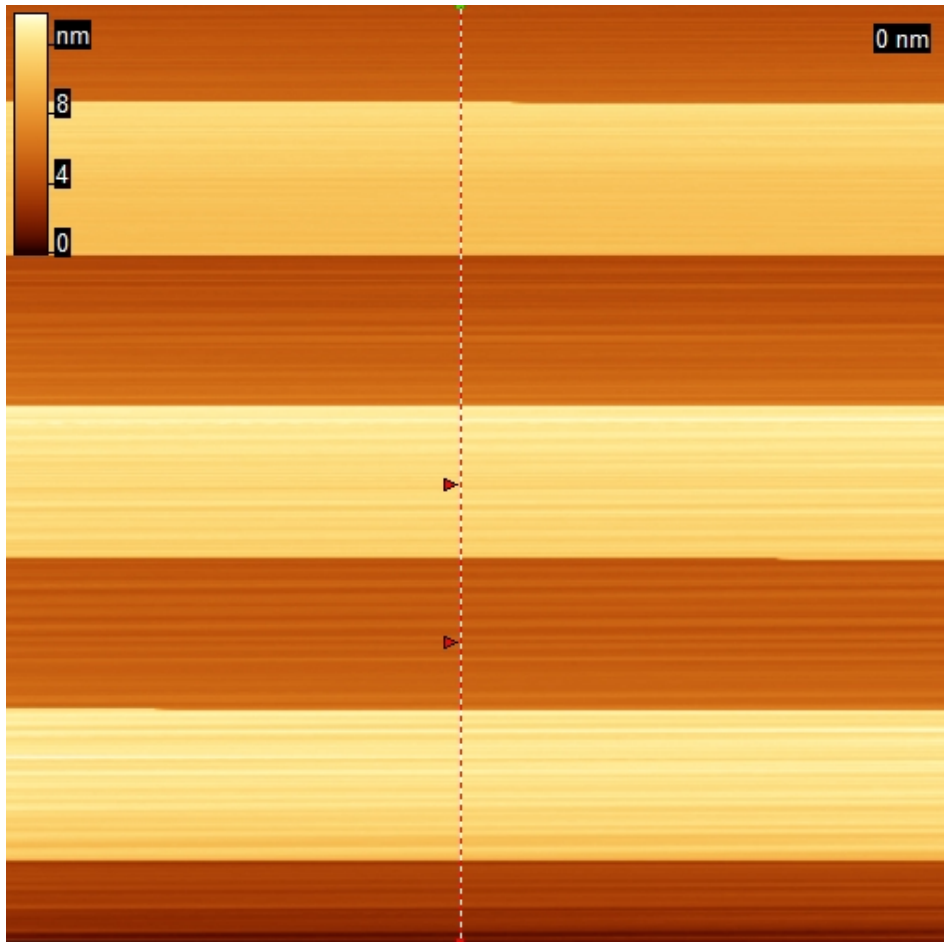
Изображения заимствованы с сайта:
<http://www.ntmdt-tips.com/products/view/tgz1>

Корректировка гистерезиса



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

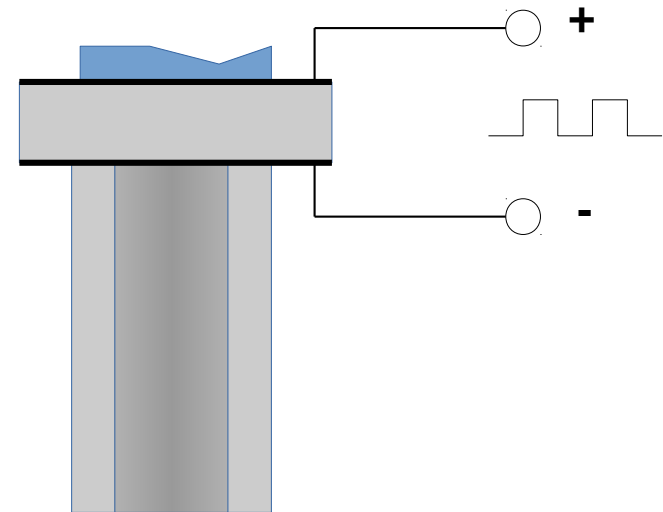
Эталон нанометра



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

$$V = 5 \text{ В}$$

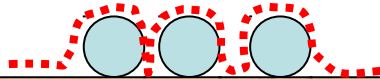
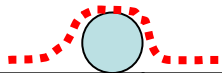
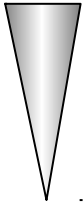
$$\Delta Z = 1 \text{ нм}$$



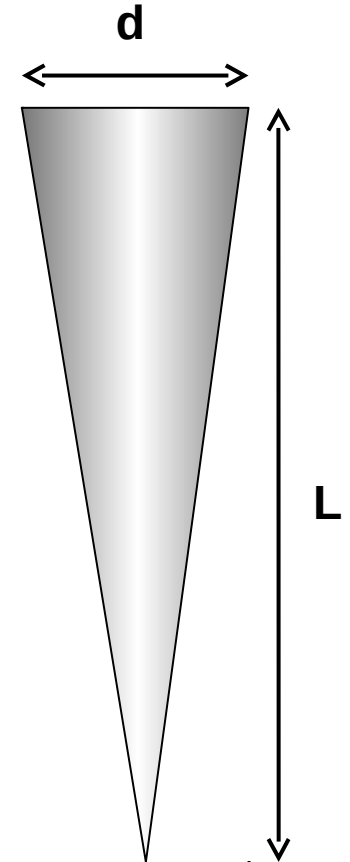
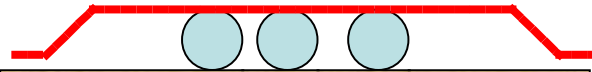
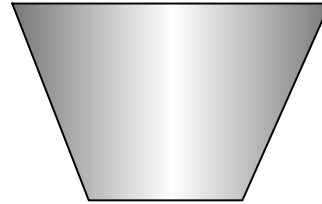
Калибровочный эталон для
профилометров и сканирующих
зондовых микроскопов
Яминский И.В., Яминский Д.И.
Патент РФ №2011116258, 2008 г.

Параметры зонда и разрешение

Острый зонд



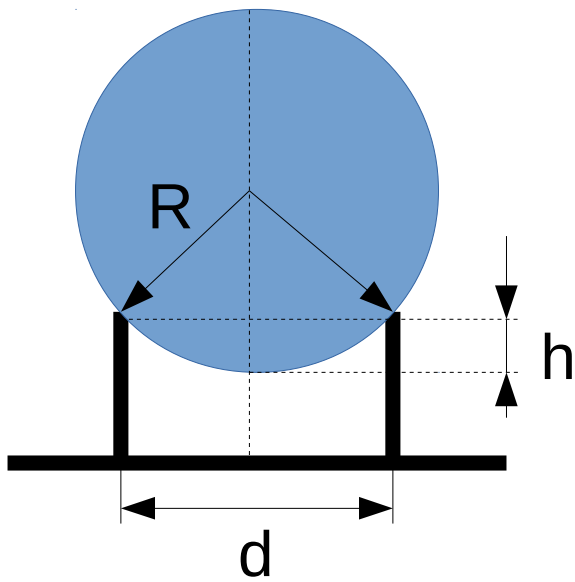
Тупой зонд



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

Параметры зонда и разрешение

Зонды с несимметричными остриями

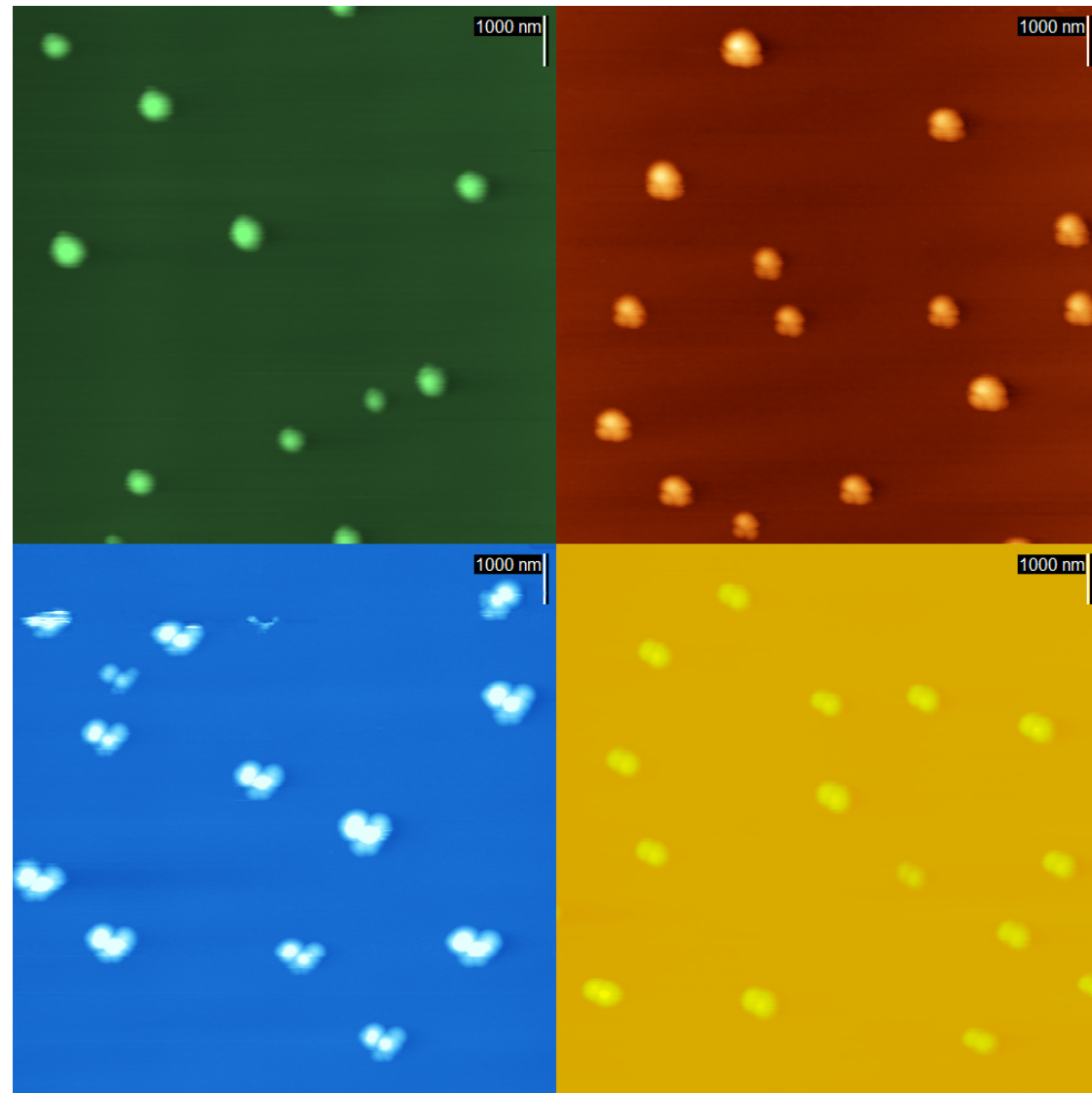


$$d = 2 \cdot \sqrt{2Rh - h^2}$$

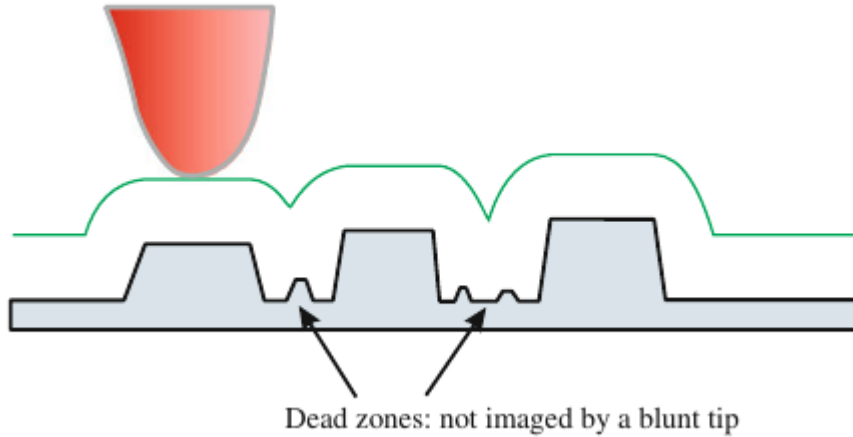
Амплитуда шума (s) = 0.1 нм
Чтобы увидеть два объекта $h > s$

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

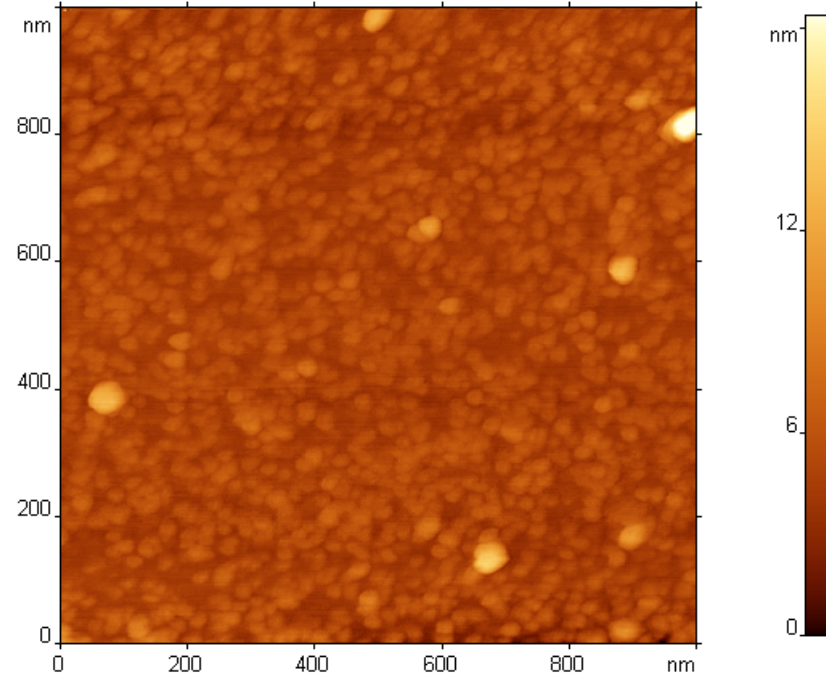
$R = 0.1$ нм, $d = 0.2$ нм



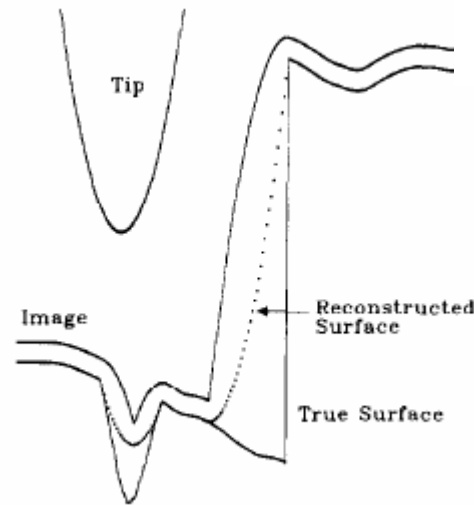
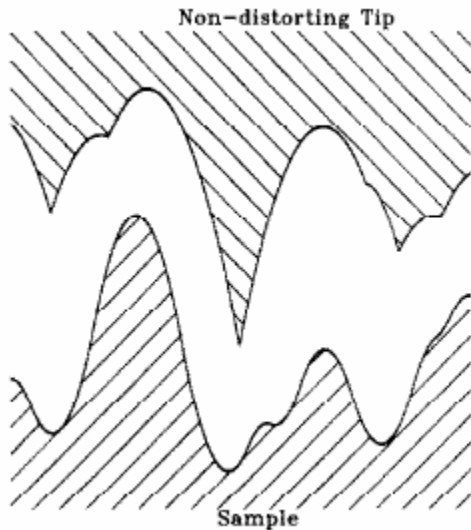
Деконволюция изображений



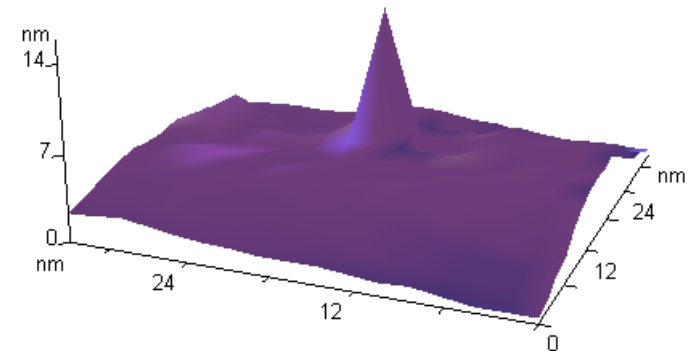
Белок на слюде



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



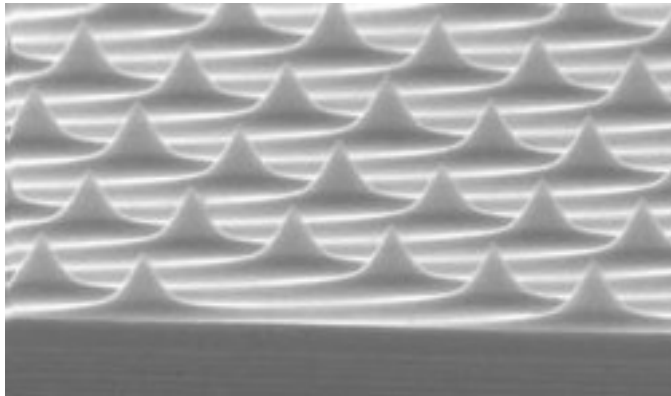
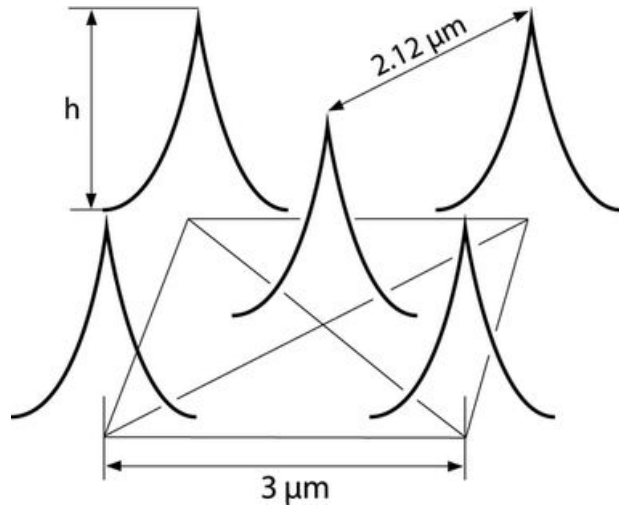
Слепая аппроксимация острья



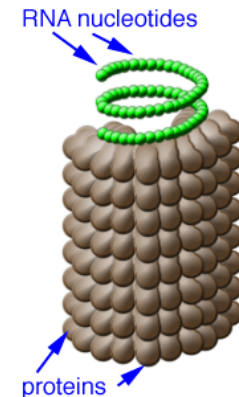
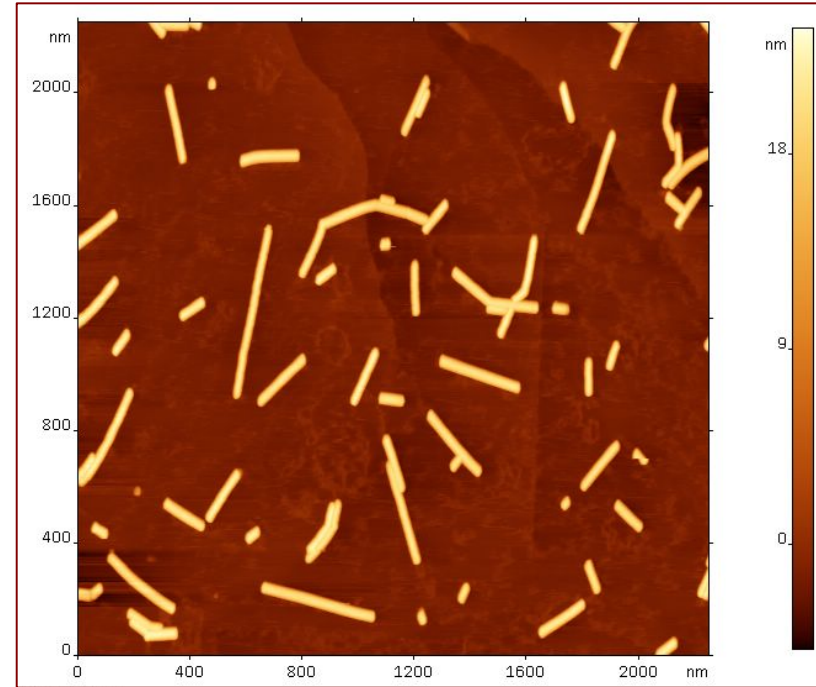
J.S. Villarrubia. Surf. Sci., 1994, 321, 287

Определение формы зонда

Калибровочная
решетка из TGT1



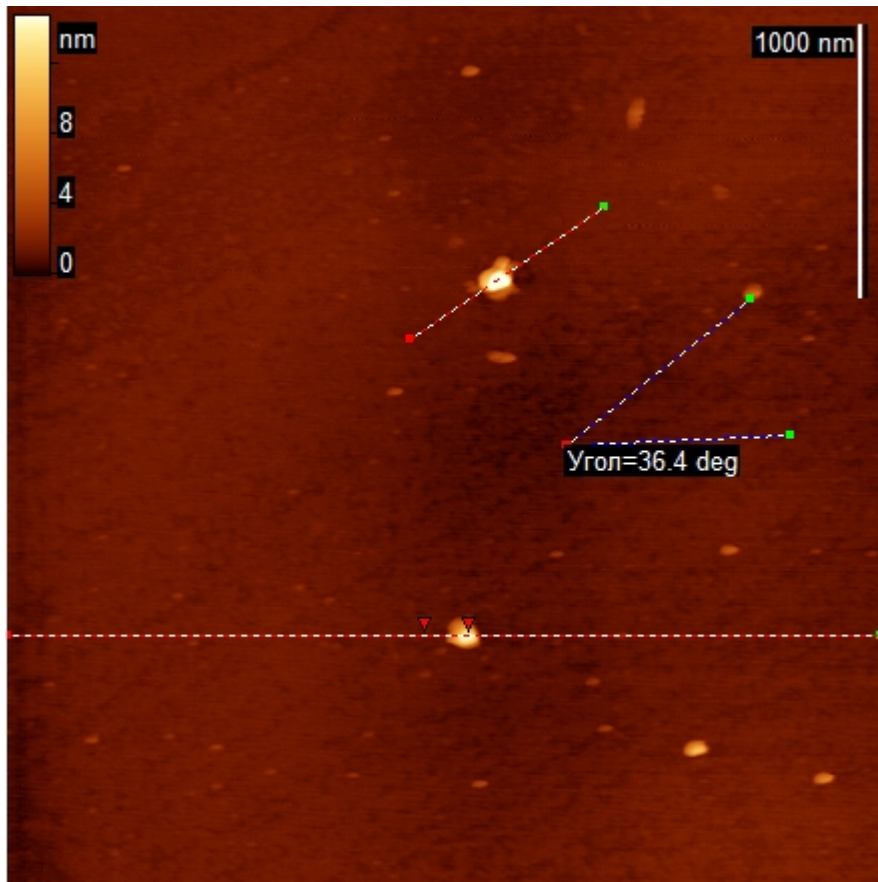
Частицы ВТМ, цилиндры с
диаметром 18 нм.



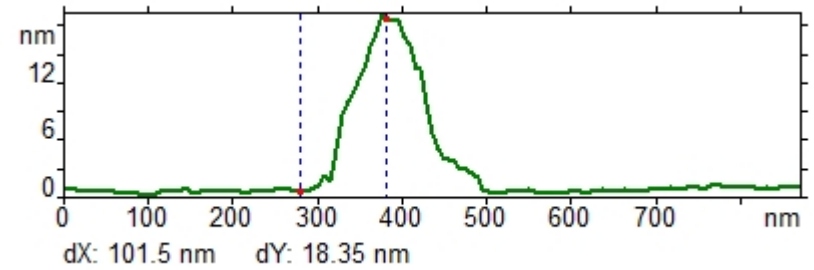
Изображение
заимствовано с сайта:
<http://concerncrisis.blogspot.ru/2008/03/tobacco-mosaic-virus-tmv.html>

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

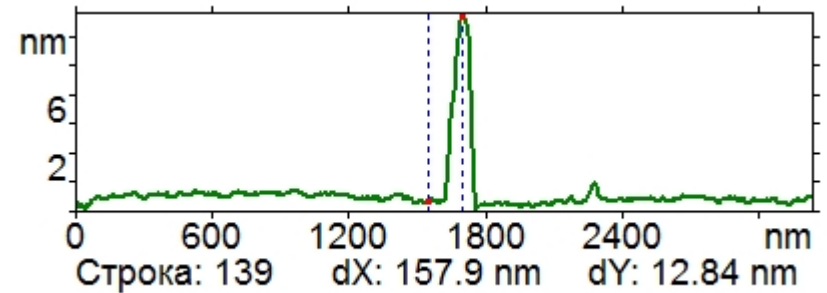
Измерение длин, высот, углов



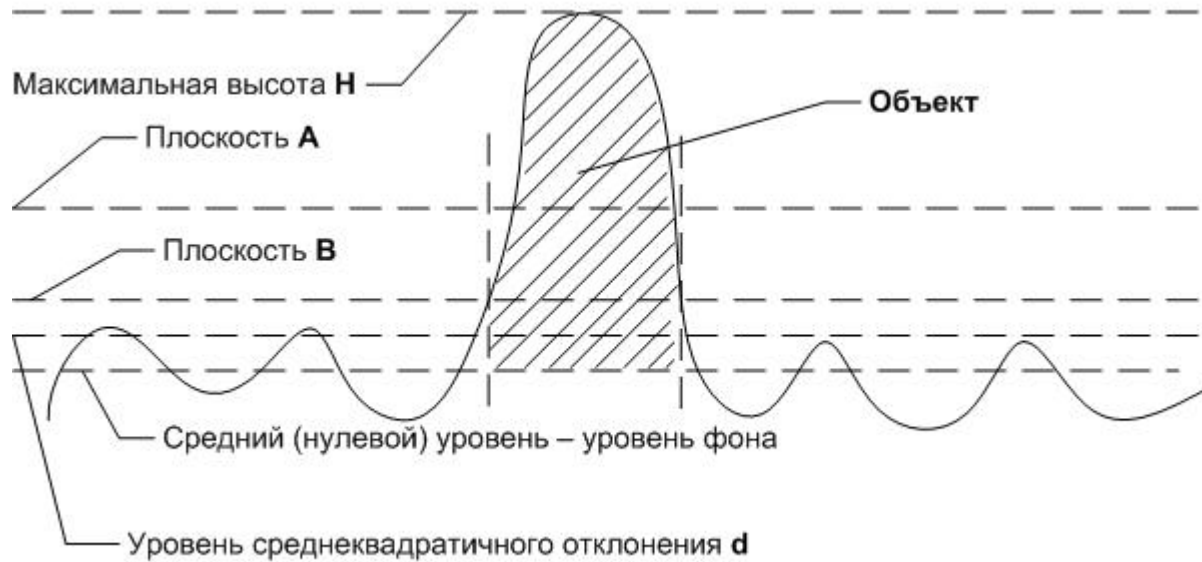
Сечение поверхности



Сечение вдоль строки быстрого сканирования

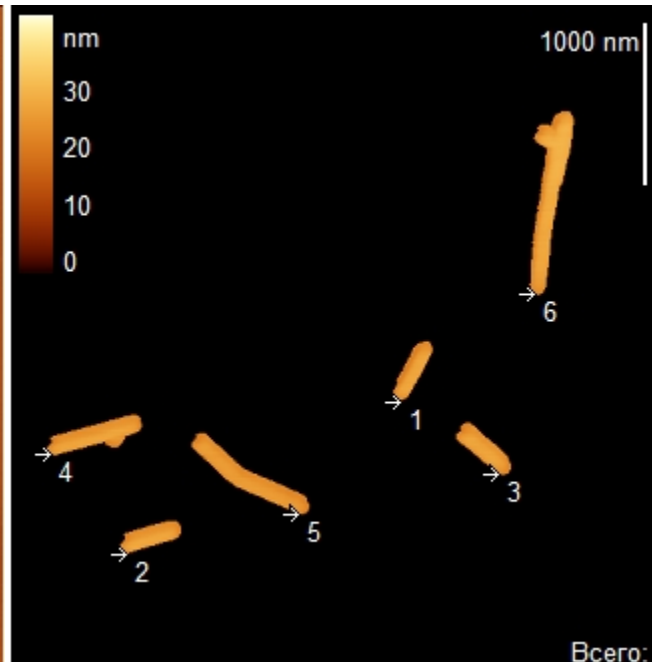
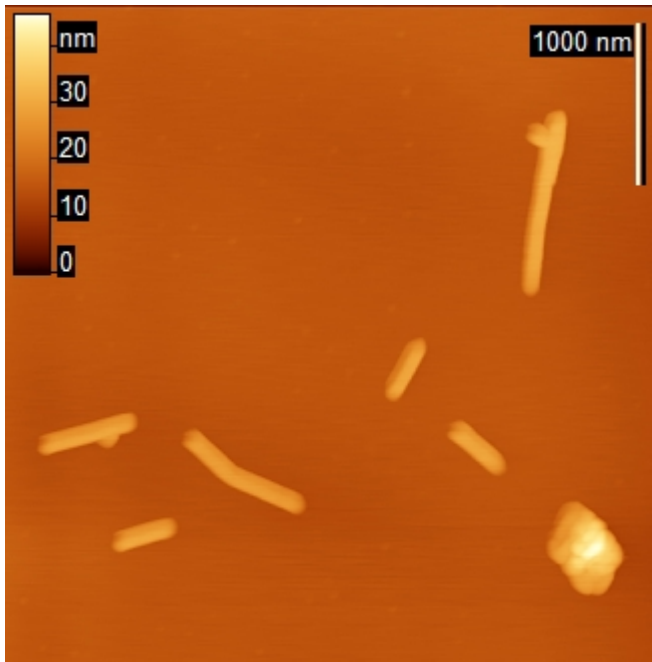
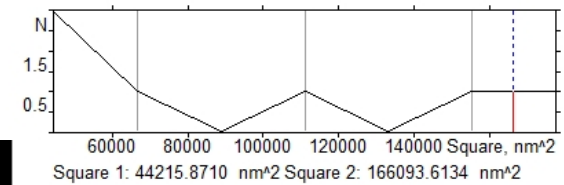


Автоматический поиск объектов



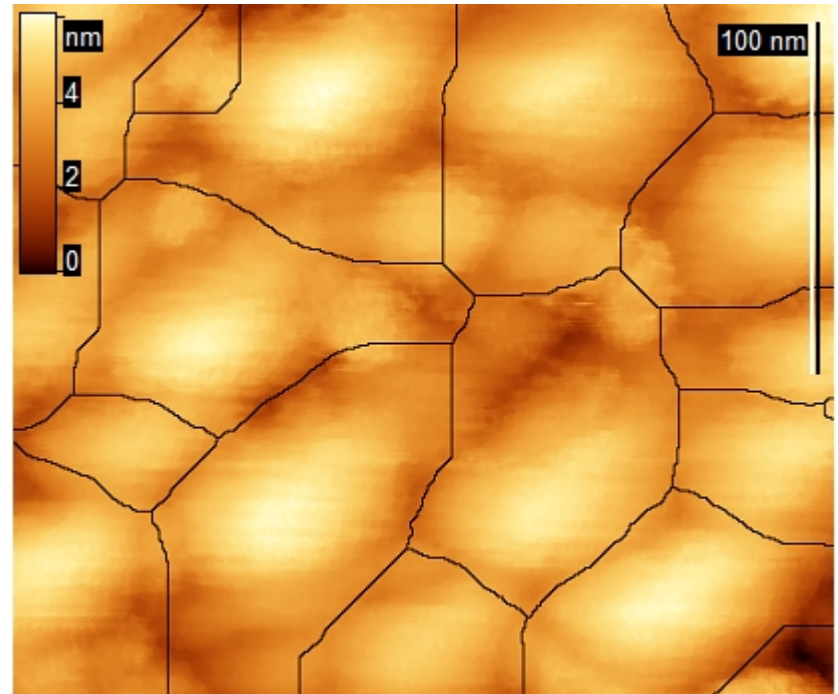
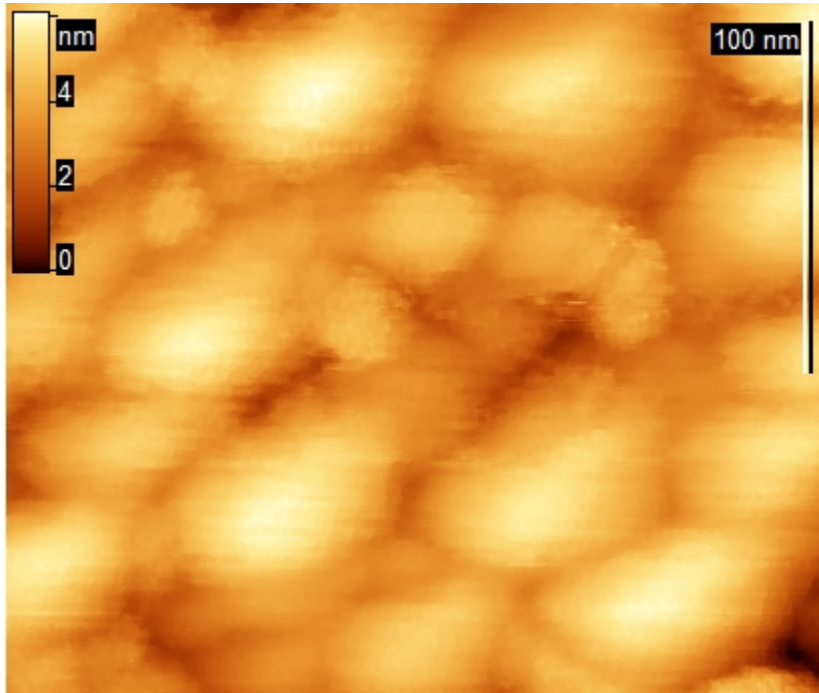
Пороговая плоскость — $\min(A, B)$, или задается вручную

Изображение заимствовано с сайта: www.femtoscanonline.com



N	S, μm^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

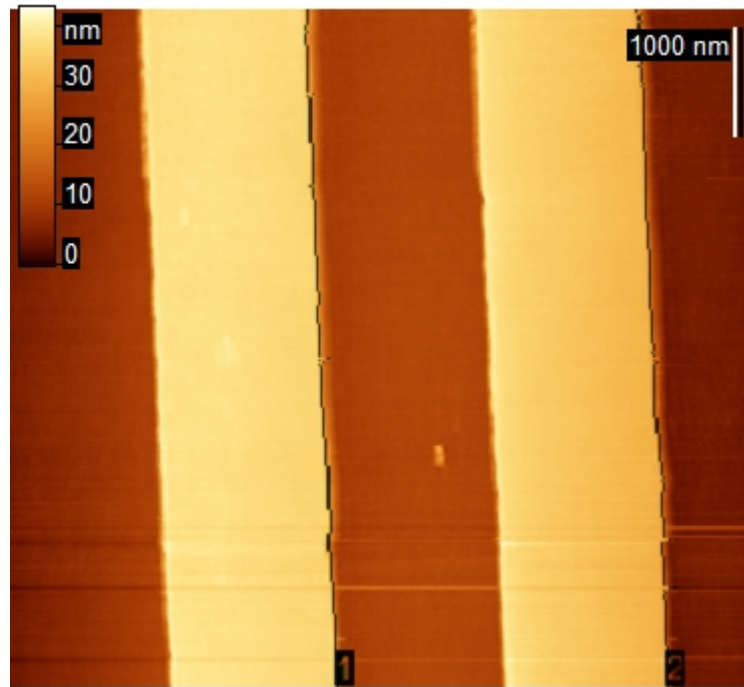
Поиск зерен



Использован алгоритм роста зерен

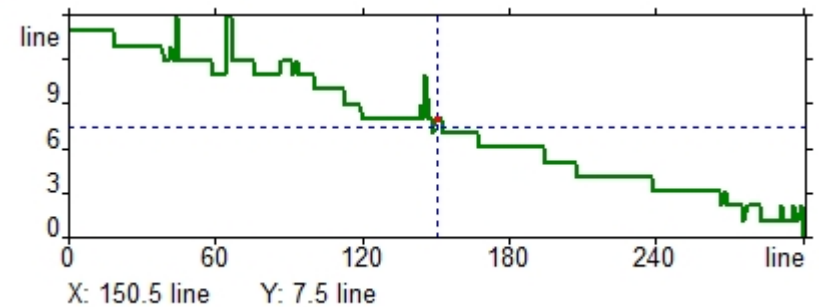
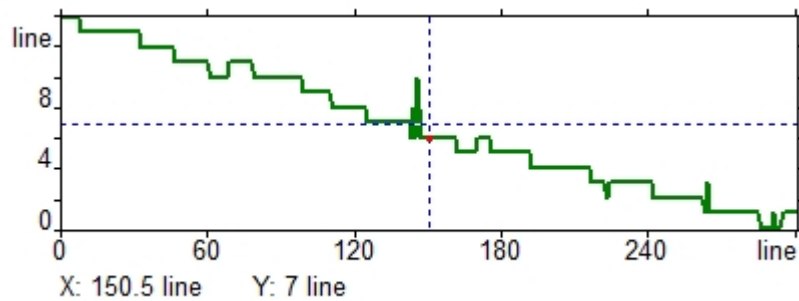
Поиск ступеней

Ищутся ступени в направлении сверху-вниз

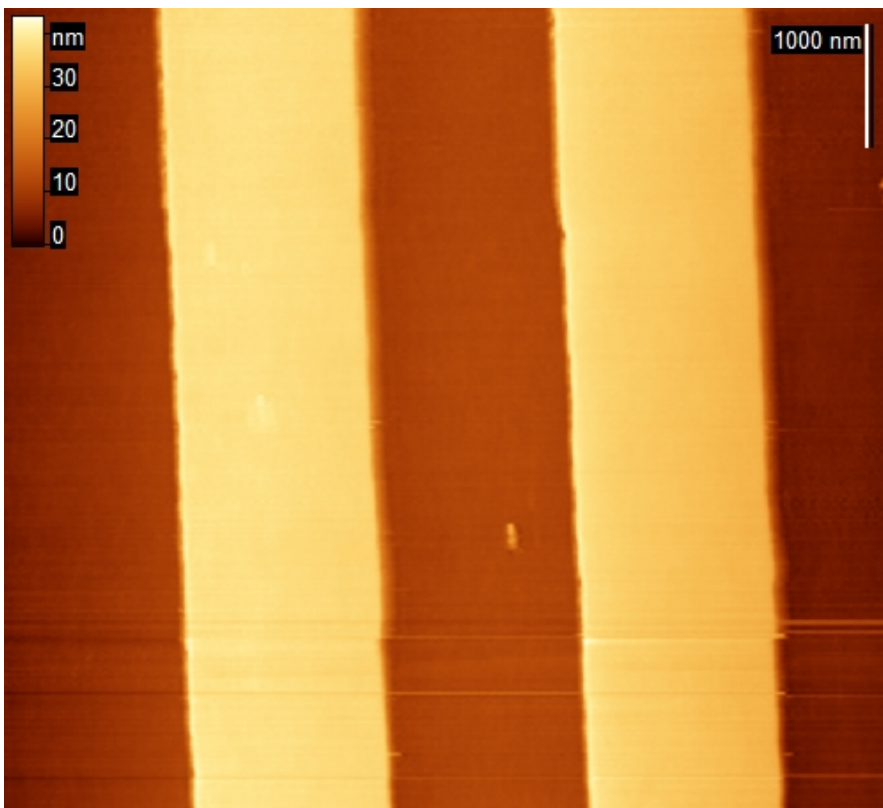


Ступень 1

Ступень 2

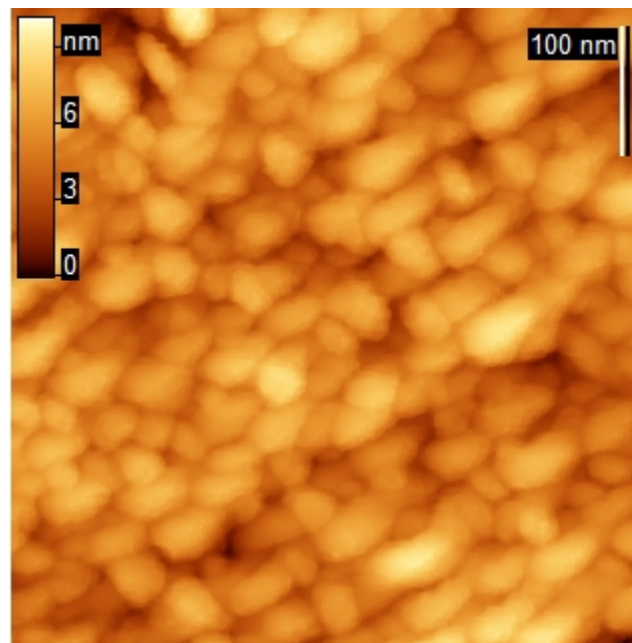


Гистограмма высот, статистический анализ поверхности

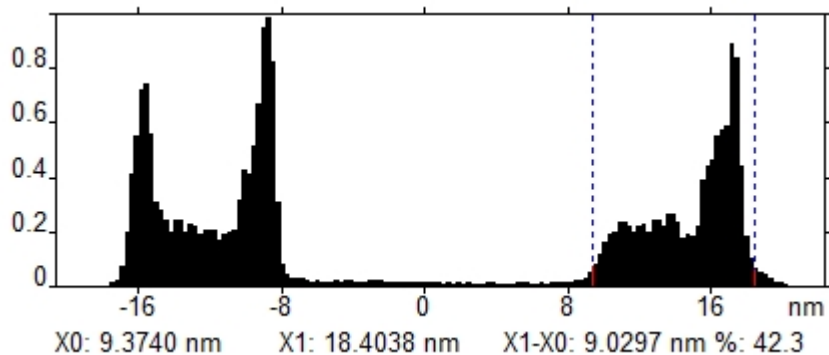


Средняя квадратичная шероховатость

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



Гистограмма высот для изображения:



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

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

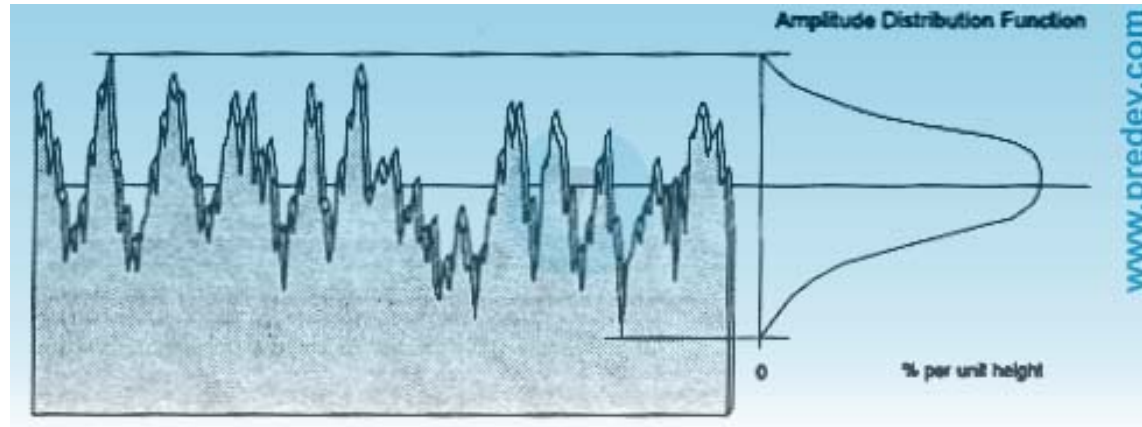
$$S_{\text{кадра}} = 0.249 \mu\text{m}^2$$

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

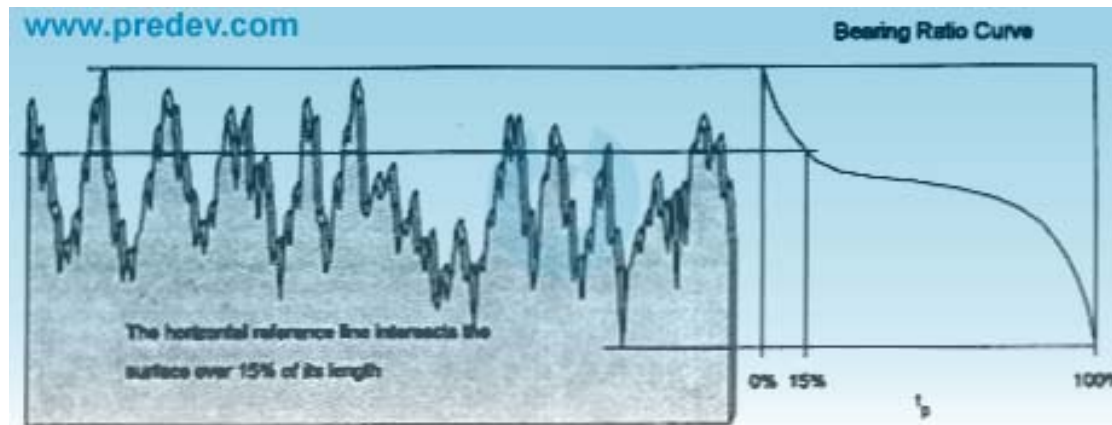
Статистический анализ поверхности

Функция распределения вероятности для профиля поверхности:

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



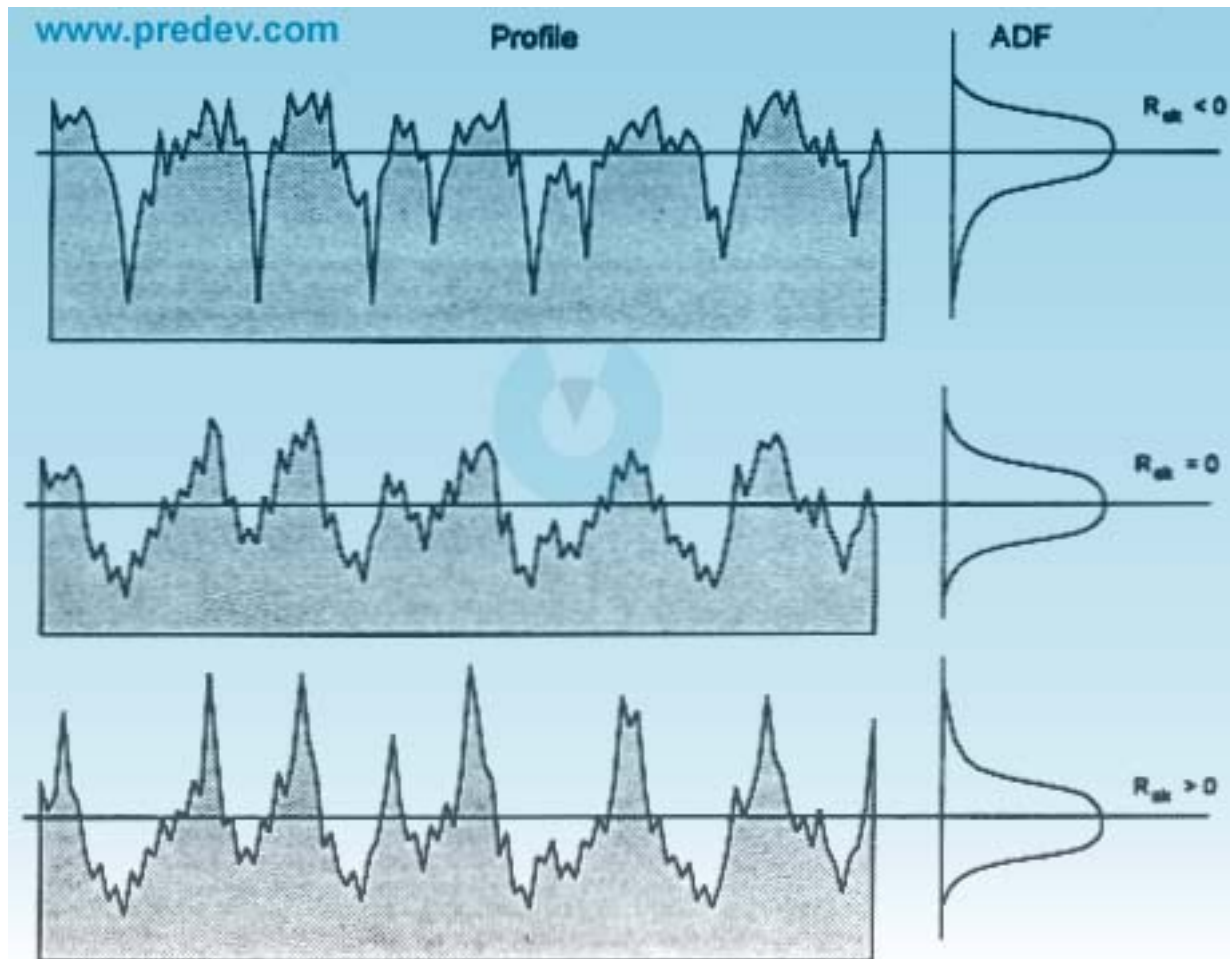
Кривая Абботта-Файерстоуна показывает, какая доля площади поверхности лежит выше заданной высоты:



Статистический анализ поверхности

Параметр асимметрии

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



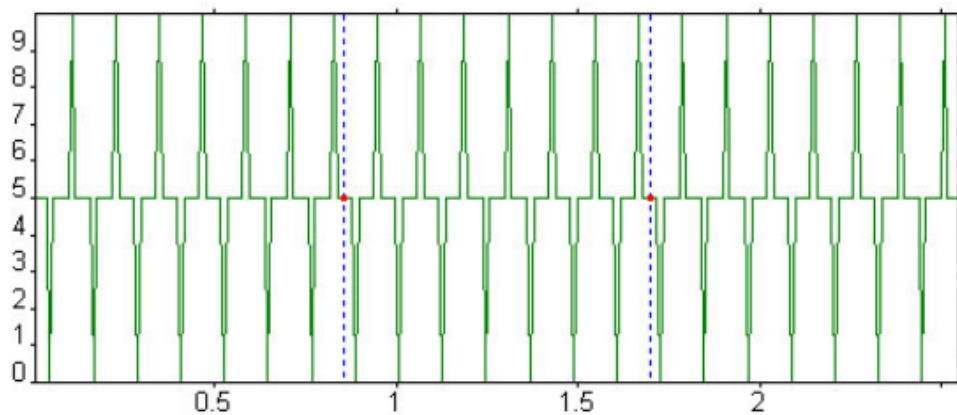
Статистический анализ поверхности: амплитудные параметры

Мера эксцесса

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

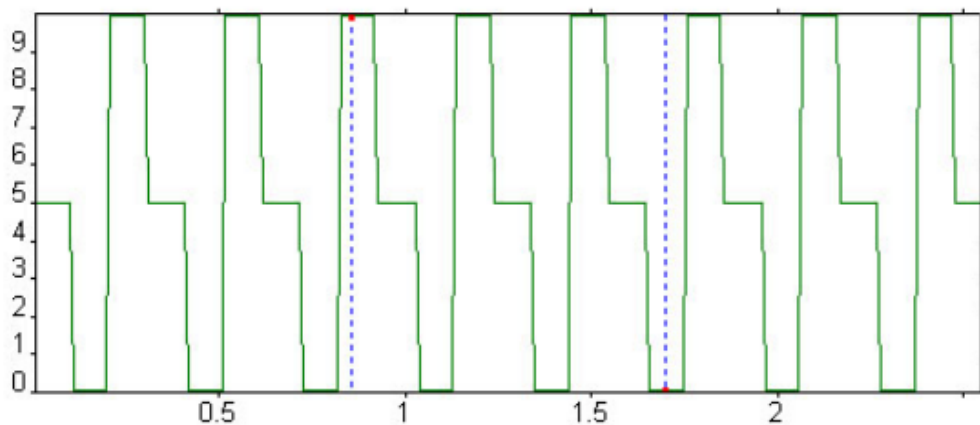
Характеризует отклонение от гауссовой формы функции распределения вероятности для профиля поверхности.

Для гауссовой формы $R_{ku} = 3$.



Узкие пики и впадины

$$R_{ku} = 6.07$$

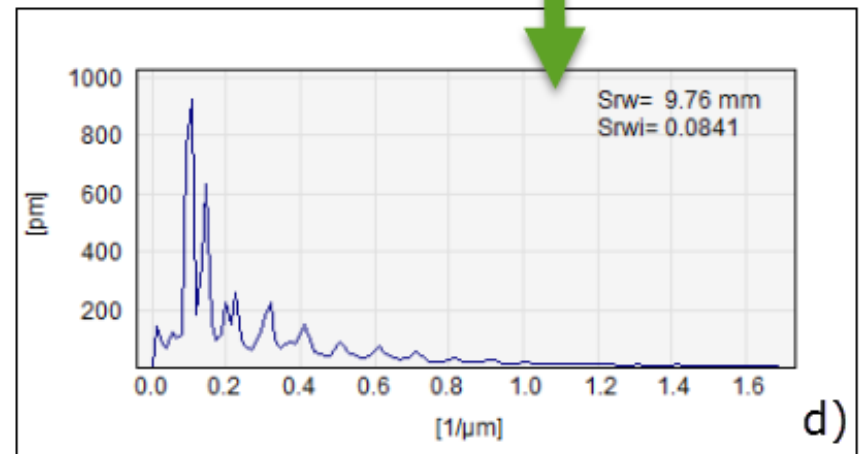
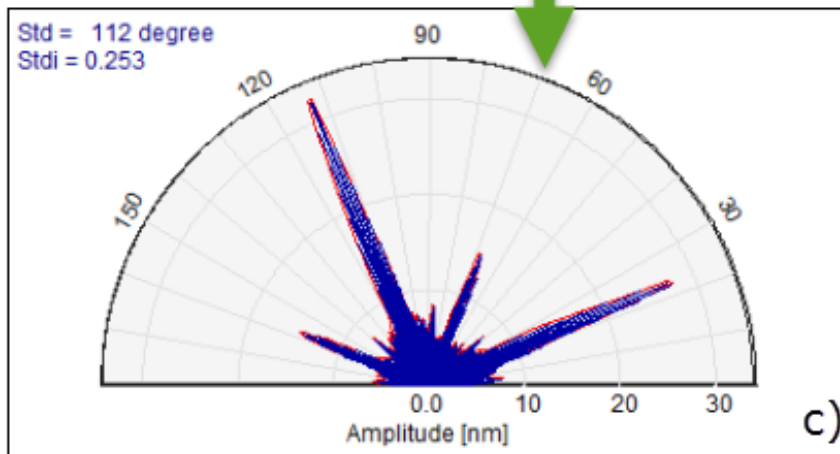
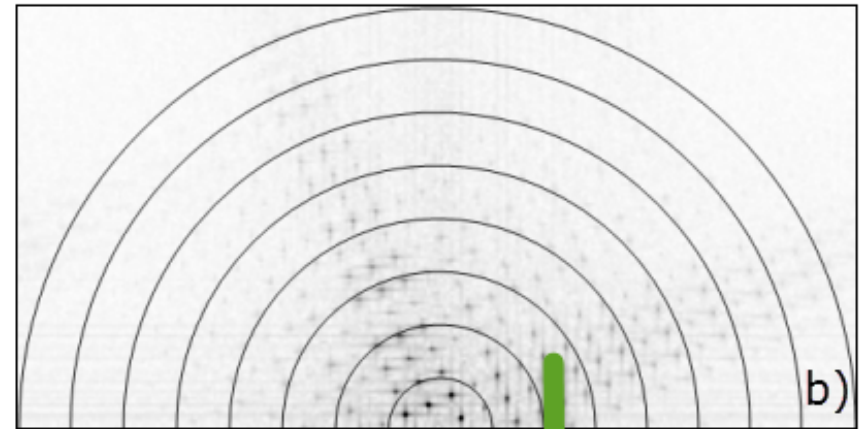
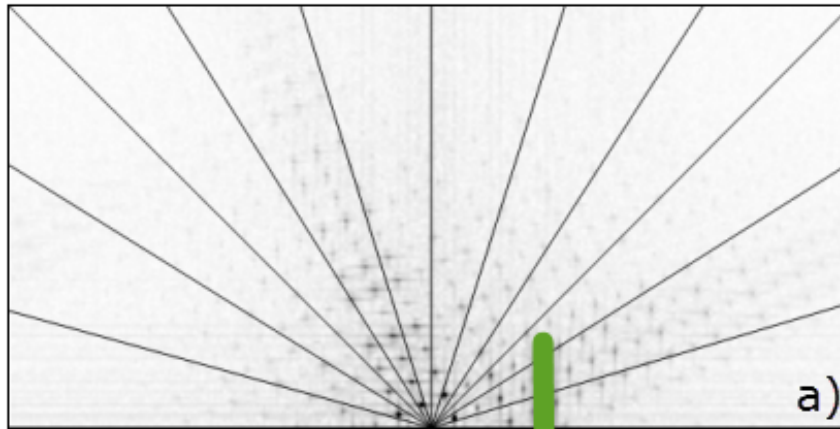


Широкие пики и впадины

$$R_{ku} = 1.6$$

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

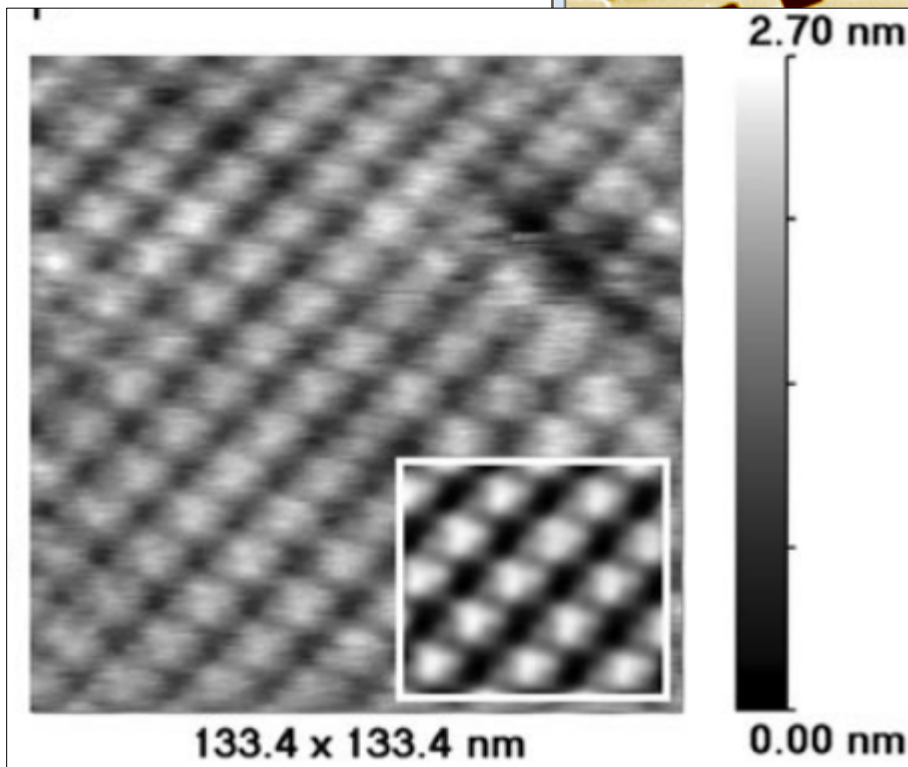
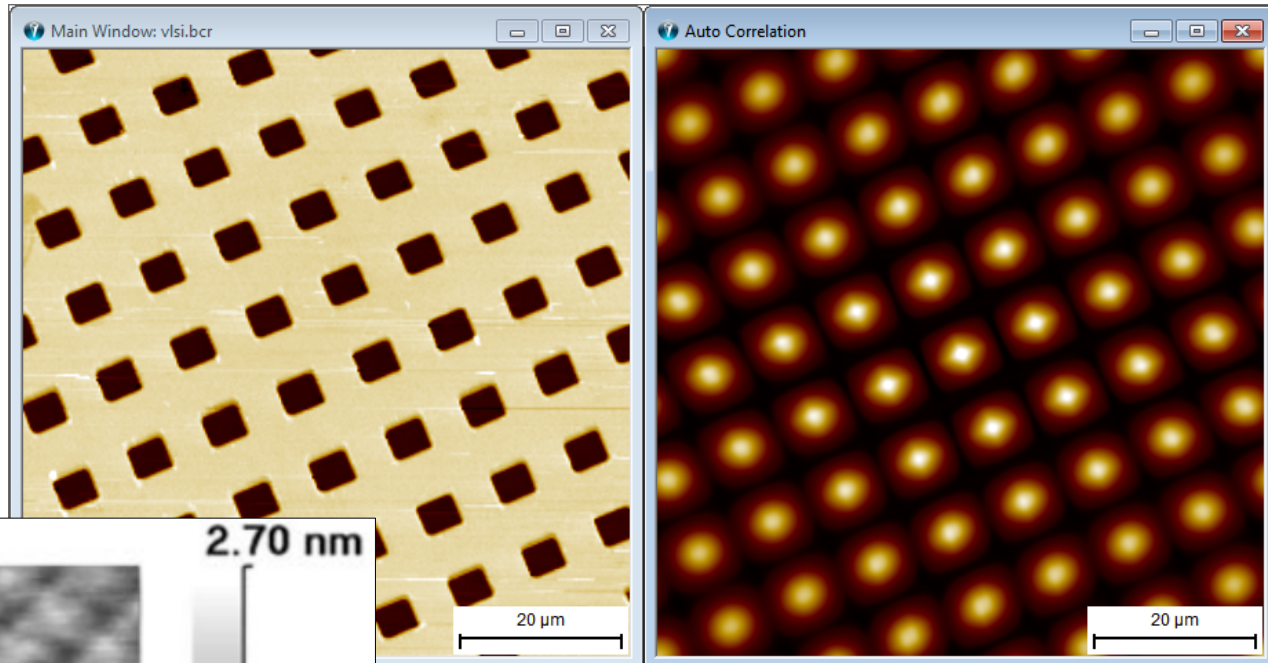
Для изотропной поверхности без доминирующей волны индексы равны 1.

<http://www.imagemet.com>

Корреляционное усреднение

Пример автокорреляции

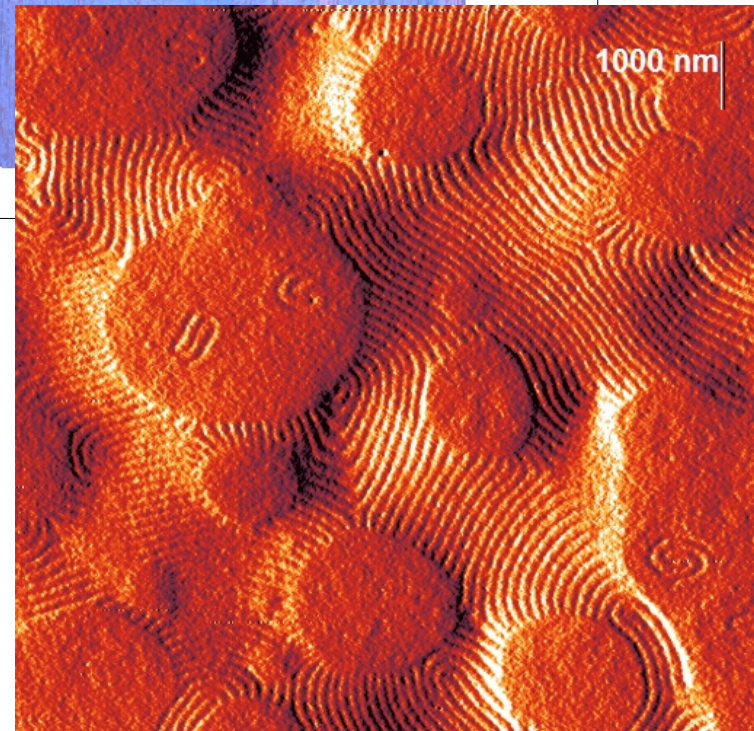
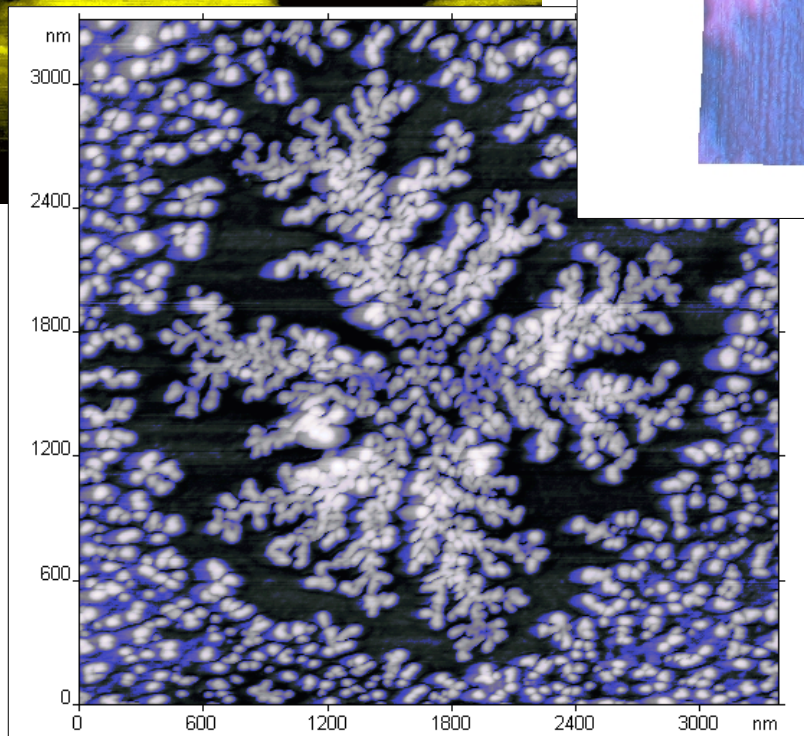
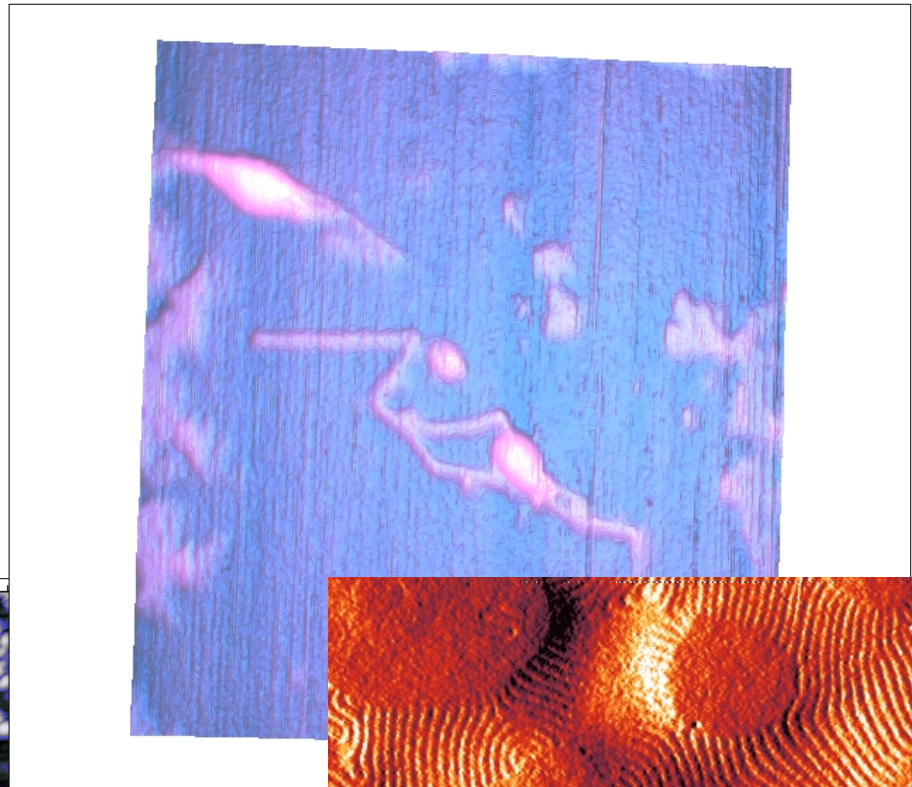
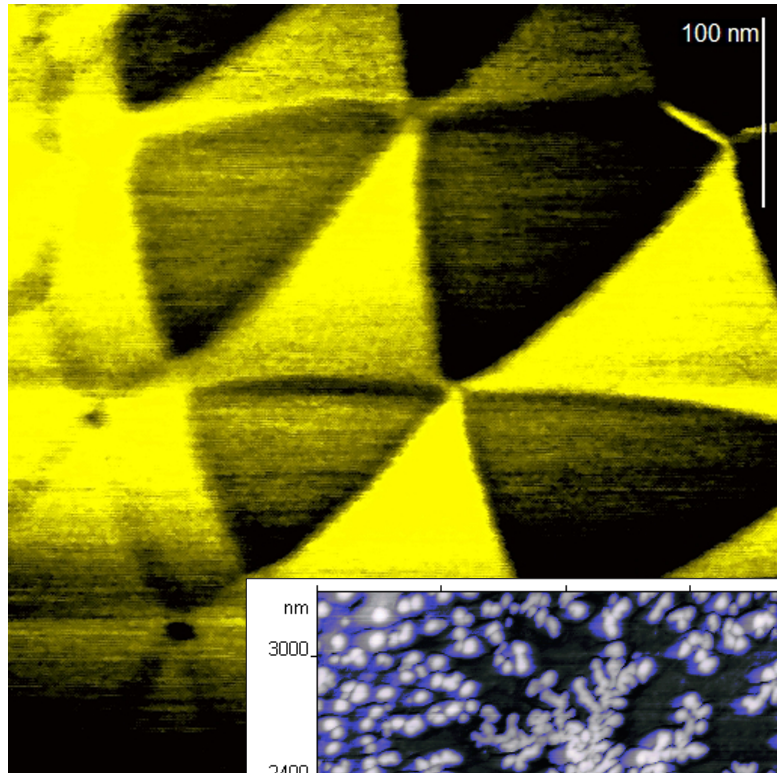
<http://www.imagemet.com>



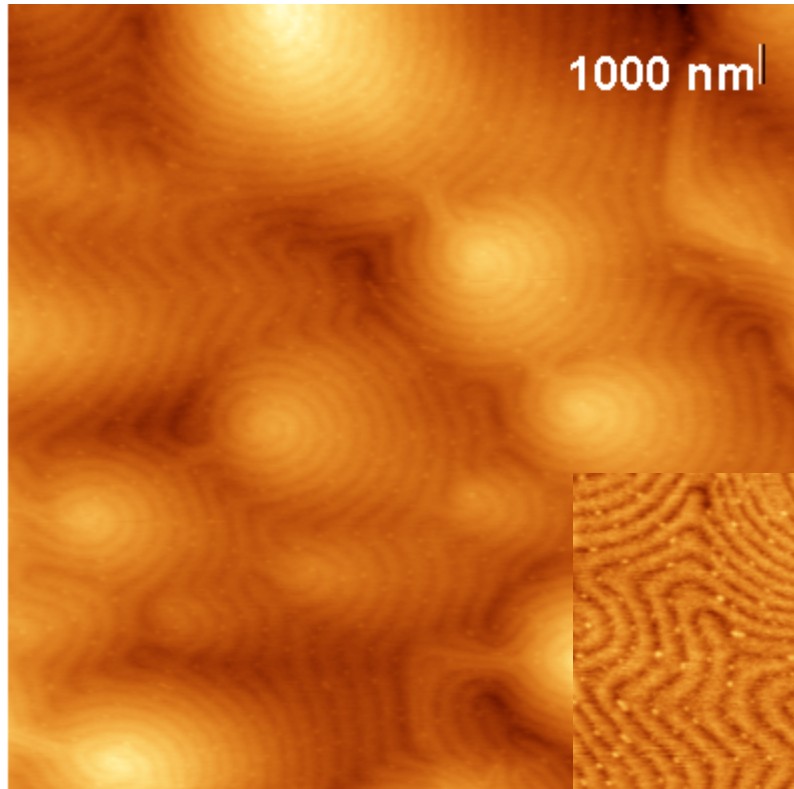
Уточнение структуры молекул
белка в 2D-кристалле на слюде

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

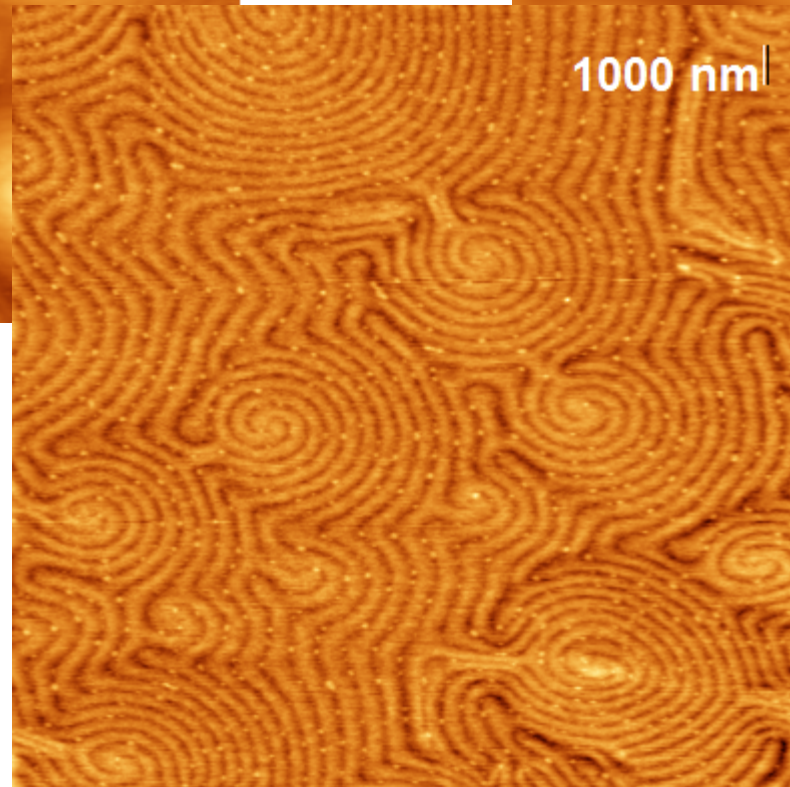
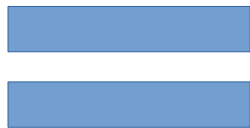
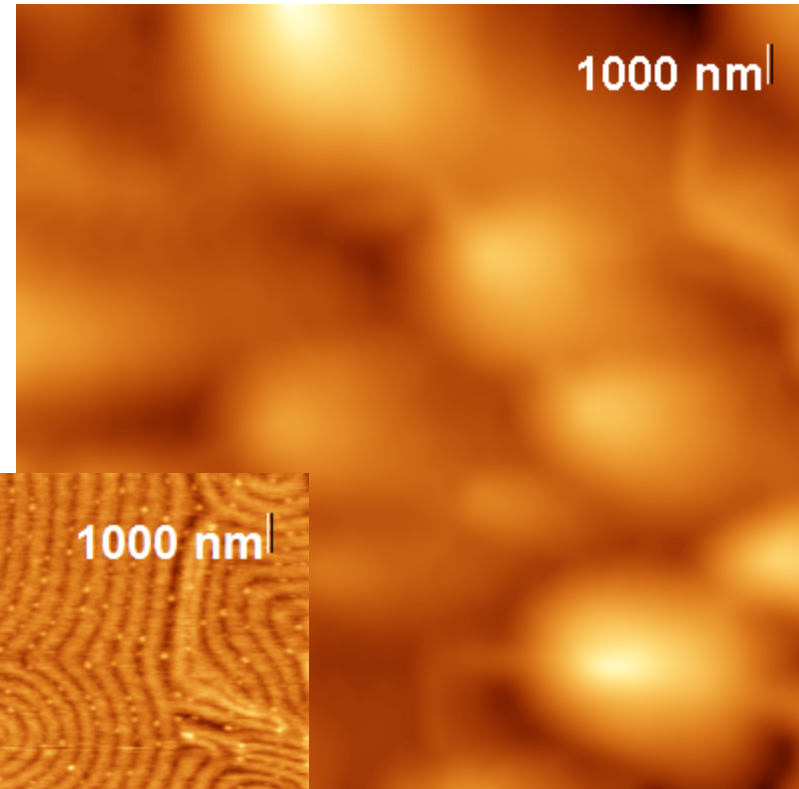
Многообразие палитр



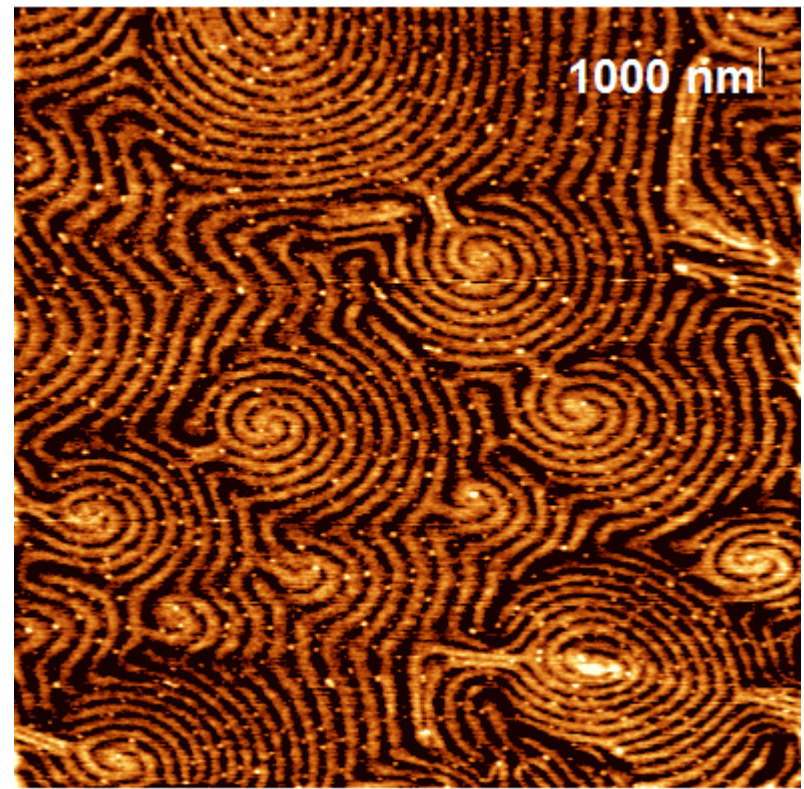
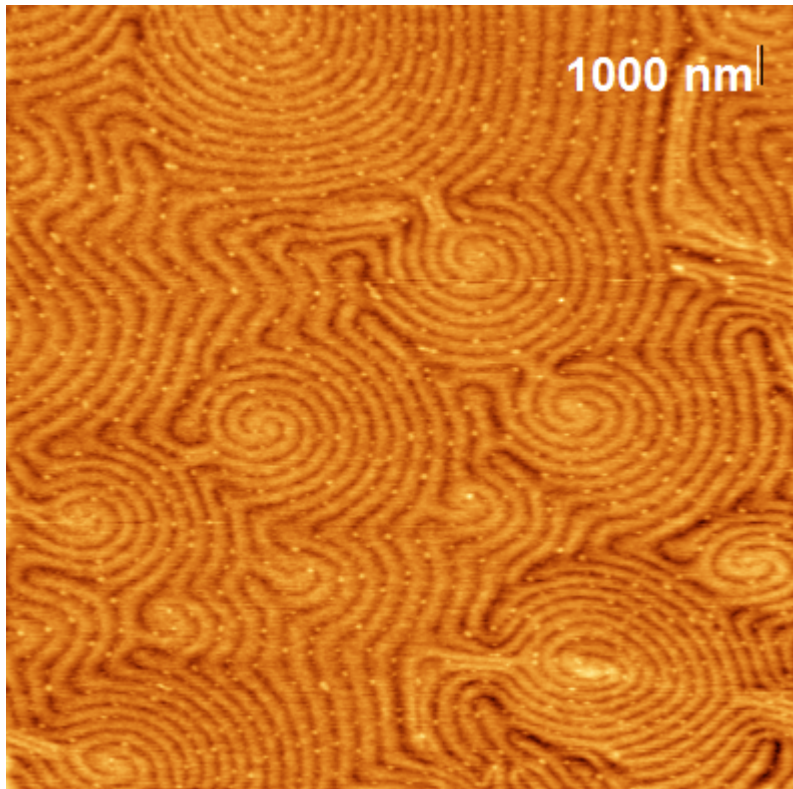
Вычитание сплайна поверхности



Сплайн
8x8

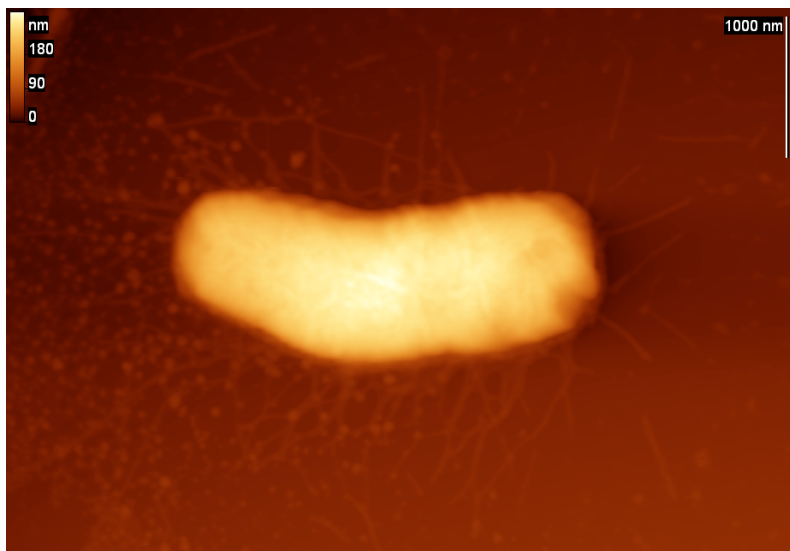


Подстройка цветовой шкалы



Как одновременно увидеть и крупные, и мелкие детали

Бактерия *E-coli*

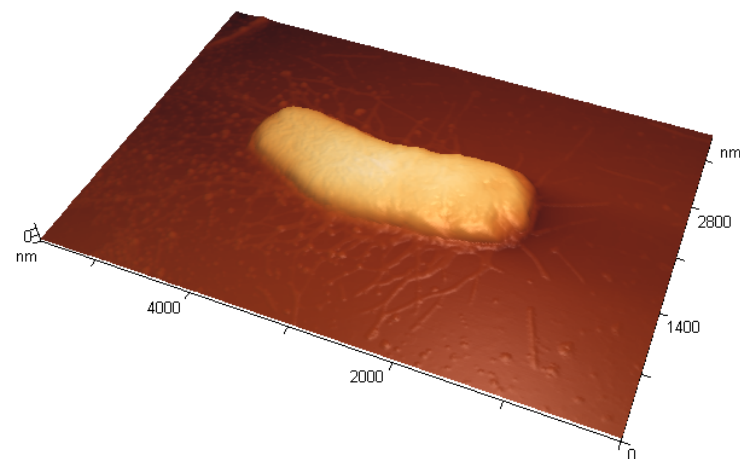
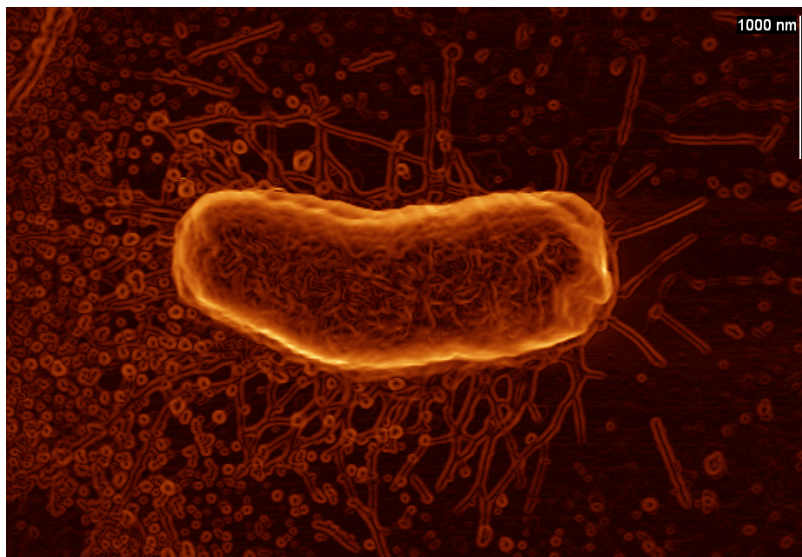


Градиентный фильтр

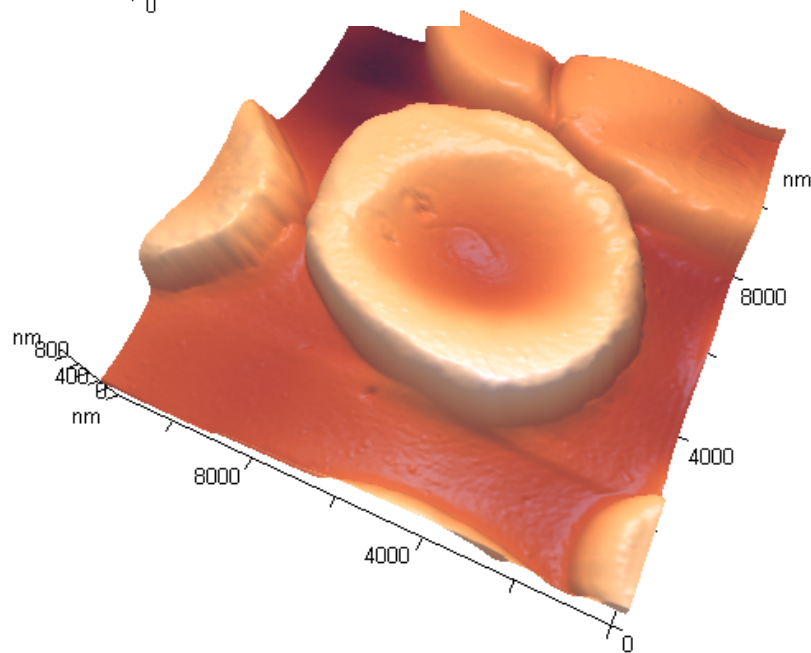
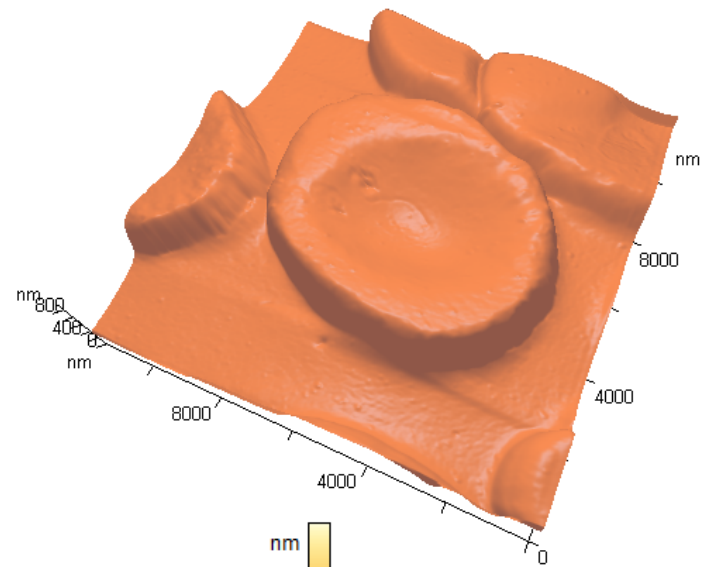
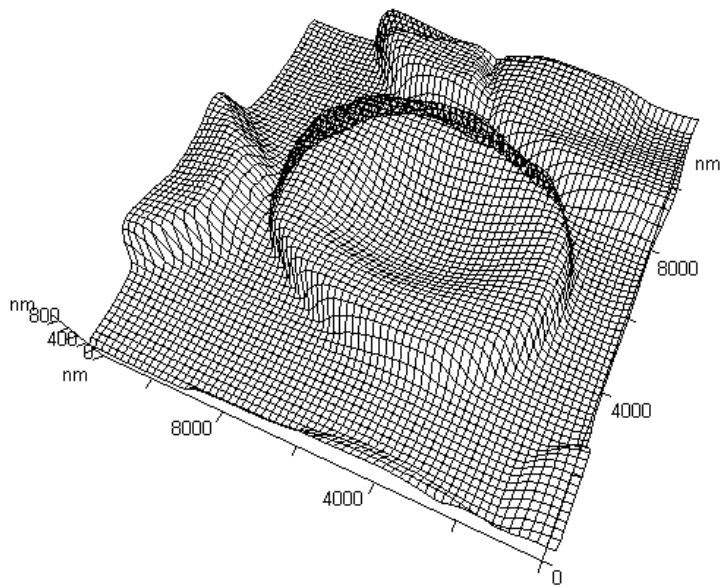
Подсветка сбоку



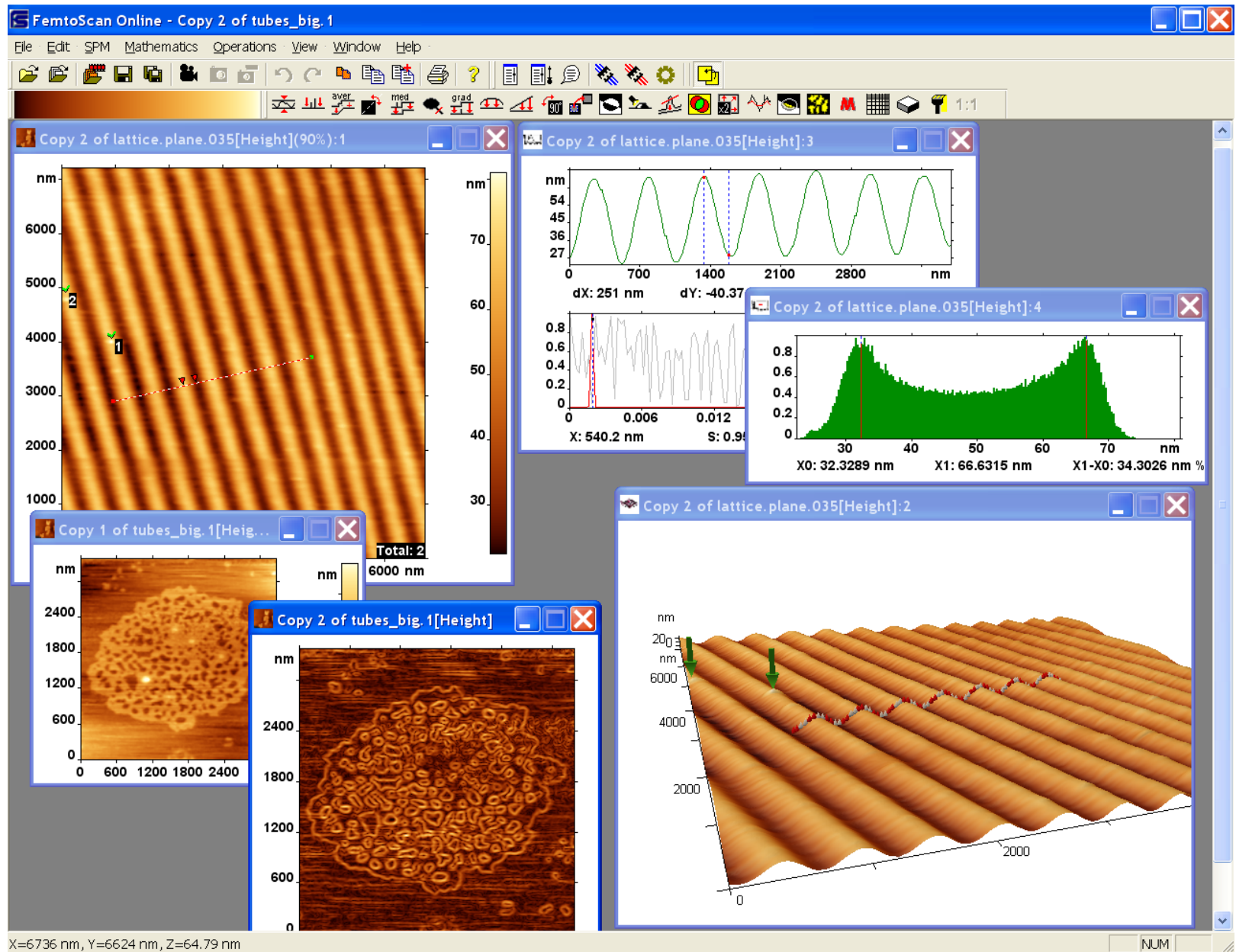
3D - изображение



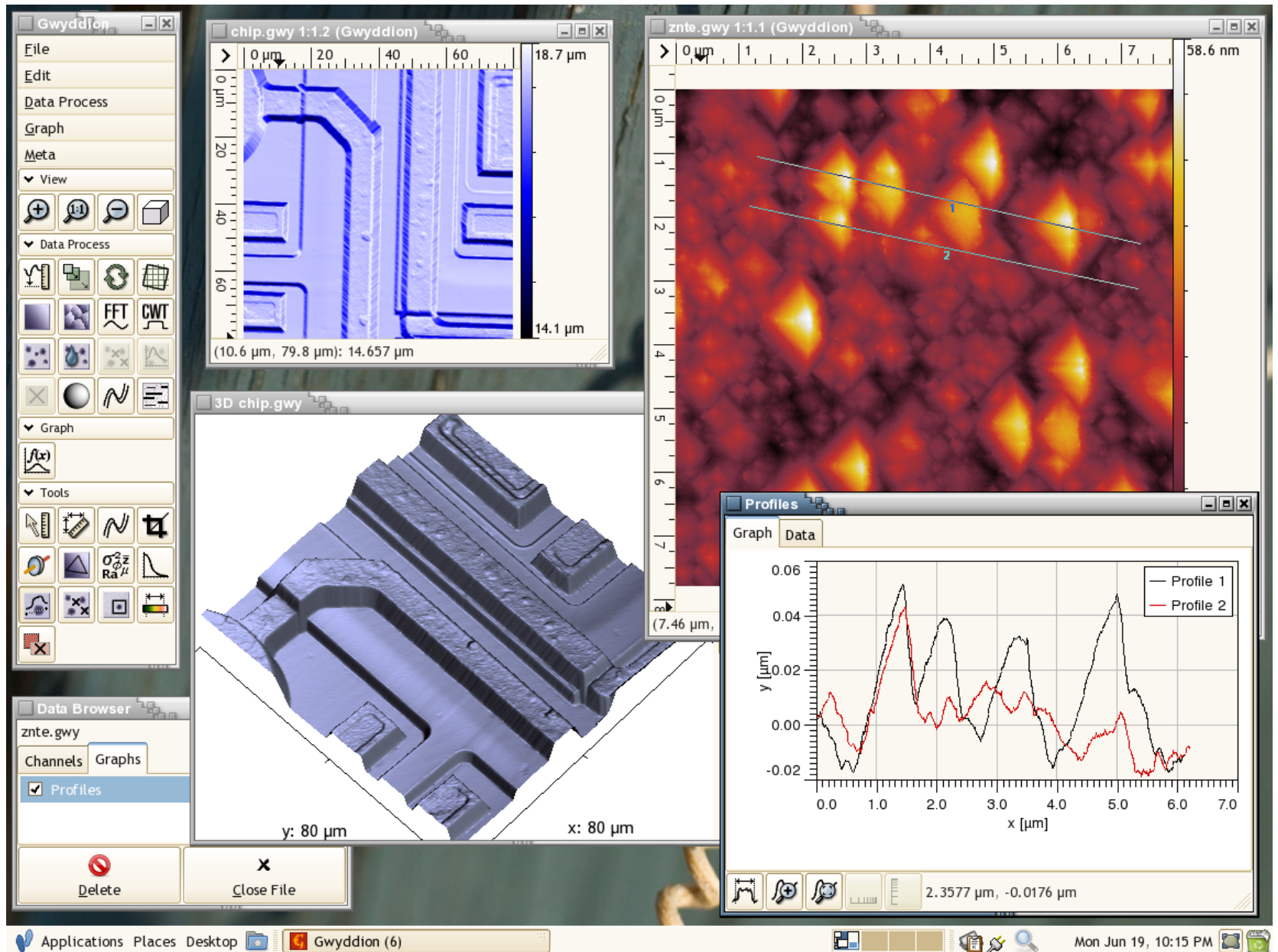
3D - изображения



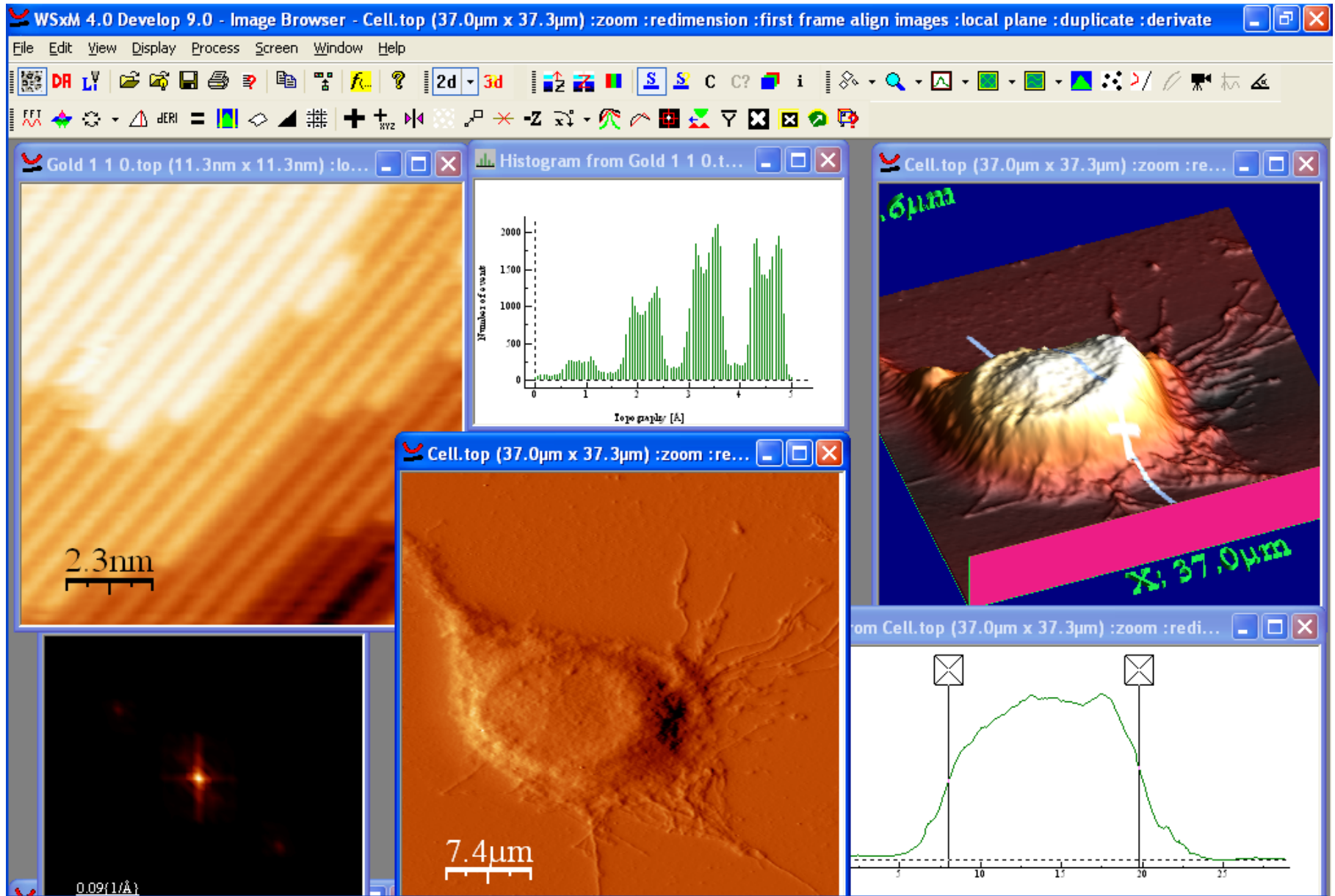
FemtoScan



Gwyddion



WSxM



Домашнее задание к лекции

Выберите одну из программ для обработки изображений:

FemtoScanOnline (femtoscanonline.com)

Gwyddion (gwyddion.net)

WSxM (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!