

# Image Analysis 3.5 Модуль обработки изображений

# Справочное руководство

31 августа 2009 г. Copyright © «НТ-МДТ»

Сайт: <u>http://www.ntmdt.ru/</u> Общие вопросы: <u>spm@ntmdt.ru</u> Tex.поддержка: <u>support@ntmdt.ru</u>

ЗАО «Нанотехнология-МДТ» 124460, Москва, Зеленоград, корп. 167

Тел.: 8-499-735-03-05, 8-499-735-83-69 Факс: 8-499-735-64-10

# Image Analysis 3.5. Модуль обработки изображений

#### Оглавление

введе	ние		5					
1. ИН	ТЕРФЕЙ	С ПРОГРАММЫ IMAGE ANALYSIS 3.5	6					
1.1.	1.1.         Основные элементы главного окна программы Image Analysis 3.5           1.2.         Билоров мариов							
1.2.	Главно	ЭЕ МЕНЮ	7					
	1.2.1.	Меню File	7					
	1.2.2.	Меню Edit	8					
	1.2.3.	Меню View	9					
	1.2.4.	Меню Filters. Analysis.						
	1.2.5.	Меню Measurement						
	1.2.6.	Меню Report						
	1.2.7.	Меню Help						
	128	IA P9 Hot Kevs Form - окно настройки горячих клавиш	11					
	129	Открытие файлов данных	13					
13	Облас	С АНАЛИЗА ФРЕЙМОВ И ЛЕРЕВО ФРЕЙМОВ	15					
1.0.	131	Вкладки области анализа фреймов	15					
	132	Пепево фпеймов	15					
	133	Дерево фремлов полого уровня	16					
	134	Френжи переосо и оторосо уровня Сохранение фреймов	10					
	13.4.	Область анализа флеймое: перечины отоблажения Опе Frame	17					
	1.5.5.	Two Frames Four Frames	10					
	136	I wo I rumes, I our I rumes						
	13.0.	Изменение шкалы по 2	·····22 21					
1 /		Синдронизиция рискриски пилитр	24 26					
1.4.		В ИПСТРУМЕНТОВ	20					
1.3.	ОРГАНИЗАЦИЯ МЕТОДОВ АНАЛИЗА И ОВРАВОТКИ С.ЗМ-ИЗОВРАЖЕНИИ							
1.0.	ПРИМЕНЕНИЕ ПРОСТЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА							
	1.0.1.	инструменты гони, Line, Angle - работа и настроика	20					
		1.6.1.2 Настройка инструмента Point						
		1.6.1.3. Работа инструмента Line						
		1.6.1.4. Настройка инструмента Line	40					
		1.6.1.5. Работа инструмента Angle	41					
		1.6.1.6. Настройка инструмента Angle	43					
	1.6.2.	Simple Section – анализ профиля поверхности						
		1.6.2.1. Работа метода Simple Section	45					
		1.6.2.2. Настройка параметров линии сечения	46					
		1.6.2.3. Окно Simple Section	46					
	1.6.3.	Сгор – инструмент кадрирования изображения	47					
		1.6.3.1. Работа инструмента Сгор						
1 7	A	1.6.3.2. Сохранение полученных результатов						
1.7.	ФИЛЬТІ	РЫ						
	1./.1.	Применение стандартных фильтров						
		1.7.1.1. Выбор фильтра через главное меню						
		1.7.1.2.         Операции со списком примененных фильтров           1.7.1.2.         Вибер фильтра церез диадоровод сище Eilter Window.						
	179	1.7.1.3. Быоор фильтра через диалоговое окно гист willdow						
	1./.2.	Описиние филотров						
		1722 Сглаживающие фильтры (Smoothing Low Pass)						
		1.7.2.3. Градиентные (дифференцирующие) фильтры						
		1.7.2.4. Контрастирующие фильтры (Sharpening, High Pass)	60					
		1.7.2.5. Нелинейные фильтры	61					

2.	AHA	ЛИЗ И (	ОБРАБОТКА ДАННЫХ	63
	2.1.	Обрабс	ЭТКА И АНАЛИЗ 2D-ДАННЫХ	63
		2.1.1.	Активация методов обработки и анализа	
		2.1.2.	Общие элементы окон обработки и анализа 2D-данных	65
			2.1.2.1. Панель 2D-данных	65
			2.1.2.2. Панель 1D-данных	66
		2.1.3.	Section Analysis – анализ профиля поверхности	
			2.1.3.1. Активация Section Analysis	68
			2.1.3.2. Oкно Section Analysis	68
			2.1.3.3. Инструменты сечений	12 רד
		214	2.1.5.4. Coxpanence inony tenhaix persynstrators.	// 70
		2.1.4.	2 1 4 1 Accurate Roughness Analysis	
			2.1.4.1. Активация Roughness Analysis	78 79
			2.1.4.3. Панель исхолных 2D-ланных	
			2.1.4.4. Панель Histogram	80
			2.1.4.5. Панель Bearing Ratio	81
			2.1.4.6. Панель Statistic Parameters	82
			2.1.4.7. Панель управления	84
			2.1.4.8. Roughness Analysis для выделенных областей	85
		215	2.1.4.9. Сохранение полученных результатов	88
		2.1.3.	Local Equalization – повышение локальных контрастов изображения	
			2.1.5.1. AKTUBALUA Local Equalization	89
			2.1.5.2. OKHO LOCAL Equalization	90 00
			2.1.5.5. Hancing ynpassioning Elocal Equalization	
			2.1.5.5. Сохранение полученных результатов	
		2.1.6.	Average FFT – вычисление среднего по строкам одномерного	
			преобразования Фурье	
			2.1.6.1. Активация метода Average FFT	96
			2.1.6.2. Окно Average FFT	96
			2.1.6.3. Работа Average FFT	
			2.1.6.4. Сохранение полученных результатов	
		2.1.7.	Average Profile – средний профиль вдоль заданного направления	
			2.1.7.1. AKTUBALUA AVERAGE Profile	
			2.1.7.2. OKHO AVERAGE PTOTILE	102
		218	Grain Analysis – Memod augusta uacmuu	103
		2.1.0.	2 1 8 1 Активания Grain Analysis	105
			2.1.8.2. Окно Grain Analysis	
			2.1.8.3. Панель управления Grain Analysis	
			2.1.8.4. Таблица геометрических параметров	108
			2.1.8.5. Гистограмма	110
			2.1.8.6. Панель инструментов гистограммы	111
			2.1.8.7. Control of computational procedure parameters - окно настройки	112
			Параметров процедуры расчета	112
			2.1.8.8. Строка командных кнопок	121
		219	$FFT$ analysis – $\Phi$ ynbe analys	122
		2.1.2.	2.1.9.1. Основные соотношения и определения, используемые для расчета	
			Фурье спектра	122
			2.1.9.2. Активация FFT Analysis	124
			2.1.9.3. Окно FFT Analysis	124
			2.1.9.4. Панель управления модуля FFT Analysis	125
			2.1.9.5. Левая панель. Вкладки: Input Image, FFT Sections, RadPSD, 2DPSD,	127
			ГЪЛ-А, ГЪЛ- I	127 134
			2.1.9.0. правал наполе - г г г ппаде 2.1.9.7. Сохранение полученных результатов	134
		2 1 10	FFT Filtration – Фулье фильтр	137
		<b>2</b> .1.10.	2.1.10.1. Активация метода FFT Filtration	
			2.1.10.2. Окно FFT Filtration	
			2.1.10.3. Панель управления FFT Filtration. Режим полосовой фильтрации	140
			2.1.10.4. Панель управления FFT Filtration. Режим локальной фильтрации	
			прямоугольным фильтром	
			2.1.10.5. Paoota FF1 Filtration	144

		2.1.10.6. Сохранение полученных результатов	156
	2.1.11.	Subtract Surface – вычитание поверхности заданного порядка	157
		2.1.11.1. Активация Subtract Surface	158
		2.1.11.2. Окно Subtract Surface	158
		2.1.11.3. Панель управления Subtract Surface	159
		2.1.11.4. Pa6ora Subtract Surface	160
	0 1 10	2.1.11.5. Сохранение полученных результатов	164
	2.1.12.	Three Points Leveling – вычитание плоскости, проходящей через	1.4.4
		три заданные точки	164
		2.1.12.1. Активация Subtract Surface	164
		2.1.12.2. OKHO I Infee Points Leveling	105
		2.1.12.5. Габота типес гониз Levening	168
	2113	Fit Lines – построинов вычитание полинома заданного порядка	168
	2.1.15.	21131 Активация Fit Lines	169
		2.1.13.2. Окно Fit Lines	169
		2.1.13.3. Работа Fit Lines	170
		2.1.13.4. Сохранение полученных результатов	171
	2.1.14.	Fit Lines by Area – построчное вычитание полинома заданного	
		порядка с учетом выделенных областей поверхности	171
		2.1.14.1. Активация Fit Lines by Area	172
		2.1.14.2. Окно Fit Lines by Area	173
		2.1.14.3. Работа Fit Lines by Area	175
		2.1.14.4. Сохранение полученных результатов	177
	2.1.15.	Histogrammed Fit Lines – построчное вычитание полинома с учетом	
		гистограммы распределения по высоте	177
		2.1.15.1. Активация Histogrammed Fit Lines	178
		2.1.15.2. Okto Histogrammed Fit Lines	178
	2116	2.1.15.3. Сохранение полученных результатов	1/9
	2.1.10.	F III ду Superposition – замена выбеленных на изображении участков	100
		суперпозициеи прилегающих участков	180
		2.1.10.1. AKTUBALIUM FILL DY Superposition	180
		2.1.16.2. OKHO F III By Superposition	182
		2.1.16.9. Габота Гип Бу Зарегрозноп	183
	2117	Fill Area	183
		2.1.17.1. Окно Fill Area	184
		2.1.17.2. Работа Fill Area	186
		2.1.17.3. Сохранение полученных результатов	188
	2.1.18.	Set Data Zeros – преобразование координат: сдвиг начала координат к	
		минимуму/максимуму	188
		2.1.18.1. Активация Set Data Zeros	189
		2.1.18.2. Окно Set Data Zeros	190
		2.1.18.3. Сохранение полученных результатов	191
	<i>2.1.19</i> .	Axis Strain/Stress – преобразование координат: растяжение – сжатие осей	191
		2.1.19.1. Активация Axis Strain/Stress	192
		2.1.19.2. Oкно Axis Strain/Stress	192
		2.1.19.3. Сохранение полученных результатов	193
	2.1.20.		194
		2.1.20.1. UKHO CUT Z	194
		2.1.20.2. Padota Cul Z	109
22	OFDATO	2.1.20.5. Сохранение полученных результатов	108
2.2.	221	$C_{\mu\nu\nu\rho}$ Eitting силиниции из кридой арароксили пруста ролицома	108
	2.2.1.	2211 Активания Сигуе Fitting	100
		2.2.1.2. Okho Curve Fifting	199
		2.2.1.3. Pafora Curve Fitting	
		2.2.1.4. Сохранение полученных результатов	
	2.2.2.	1D FFT – одномерное преобразование Фурье	202
		2.2.2.1. Активация метода 1D FFT	203
		2.2.2.2. Окно 1D FFT	204
		2.2.2.3. Сохранение полученных результатов	206

# Введение

Основная задача программы **Image Analysis 3.5** – обработка и анализ СЗМ изображений и СЗМ данных, полученных при помощи СЗМ приборов компании «НТ-МДТ» и имеющих формат **MDT**.

Программа содержит широкий набор самых разнообразных методов анализа и обработки СЗМ изображений и соответствующих им двумерных и одномерных функций:

- анализ профиля поверхности для различных сечений;
- анализ шероховатости поверхности;
- спектральный анализ;
- пространственная фильтрация с использованием широкого набора стандартных фильтров. В программе также предусмотрена возможность конструирования собственных фильтров;
- преобразования СЗМ изображений посредством вычитания поверхностей заданного порядка;
- преобразования СЗМ изображений посредством вычитания полиномов заданного порядка;
- преобразования исходных данных (исходных функций) типа преобразования координат: сдвиг, сжатие/растяжение осей, поворот на заданный угол;
- различные методы редактирования изображений;
- арифметические операции с несколькими изображениями.

# 1. Интерфейс программы Image Analysis 3.5

# 1.1. Основные элементы главного окна программы Image Analysis 3.5

Основными элементами главного окна программы **Image Analysis 3.5** являются (Рис. 1-1):

- Главное меню;
- Дерево фреймов;
- Область анализа фреймов;
- Панель инструментов;
- Дерево методов;
- Область отображения результатов измерений;
- Панель управления фильтрами (вкладка **Applied Filters**), панель ввода комментария (вкладка **Note**);
- Список последних применявшихся методов.



панель инструментов область отображения результатов измерений

панель управления фильтрами

Рис. 1-1. Интерфейс программы Image Analysis 3.5

# 1.2. Главное меню

Главное меню (Рис.1-2) содержит меню: File, Edit, View, Filters, Analysis, Measurement, Report, Help.

File Edit View Filters Analysis Measurement Report Help

Рис.1-2. Главное меню

# 1.2.1. Меню File

Меню File (Рис.1-3) содержит команды для работы с файлами данных:

File	Edit	View	Filters	Analysis	Measurement	Report	Help				
43	Open.	Ctrl+	0								
	Close	File									
	Save All Frames										
	Save 3	Selecte	d Frames								
	Save P	Results									
	Save P	rames	with Res	ults							
	Export	t									
	Delete	select	ed frame	s		Ctrl+D	el				
	Delete										
	Clear All										
	Proper	Ctrl+	ŀР								
	Hot ke	Ctrl+	-H								
	C:\md	t-files\g	)rain\0-la	at.mdt							
	C:\md	t-files\g	grain\mdt	:-galereia\o	pal_matrix.mdt						
	C:\md	t-files\g	grain\mdt	:-galereia\r	nagnetic_domaii	ns.mdt					
	C:\md	t-files\g	grain\mdt	:-galereia\o	pal_matrix2.mo	lt					
_	C:\md										
	C:\IA-	P9\Tes	t\IA_P9_	.0.1003\IAP9N	oName.mo	lt					
	Exit				Alt+f	=4					

Рис.1-3. Меню File

Табл. 1-1 Команды меню File

<b>Open</b> (Ctrl+O)	Открывает диалоговое окно для выбора и загрузки необходимого файла.				
Close File	Закрывает выделенный файл данных				
Save All Frames	Сохраняет все фреймы данных, находящиеся в дереве фреймов, в качестве нового файла данных.				
Save Selected Frames	Сохраняет выделенные фреймы в выбранный файл данных.				
Save Results	Сохраняет присоединенные фреймы, если последние имеются, в выбранный файл данных.				
Save Frames with Results	Сохраняет фрейм и присоединенные фреймы, если последние имеются, в выбранный файл данных.				
Delete Selected Frames	Удаляет из дерева фреймов выделенные фреймы				
Delete Results	Удаляет из дерева фреймов выделенные присоединенные фреймы.				
Clear All	Удаляет из дерева фреймов все фреймы.				
Properties	Открывает диалоговое окно <b>Properties</b> , в котором отображаются свойства выделенного фрейма.				
Hot key list	Открывает диалоговое окно IA3 Hot Keys Form - окно настройки горячих клавиш.				
Exit	Закрывает программу обработки изображений.				

# 1.2.2. Меню Edit

Меню Edit (Рис.1-4) содержит команды:



Рис.1-4. Меню Edit

**Сгор** – инструмент редактирования изображения, вырезает выделенный участок изображения.

Add Note — открывает диалоговое окно Add Note To Frames, которое позволяет добавлять комментарии к фрейму.

# 1.2.3. Меню View

Меню **View** (Рис.1-5) содержит ряд команд для настройки изображения и интерфейса:



Рис.1-5. Меню View

Табл. 1-2. Команды меню View

Arrow	Отменяет действие выбранного ранее инструмента							
Zoom In	Инструмент увеличения, увеличивает выделенный фрагмент изображения;							
Zoom Out	Инструмент уменьшения, уменьшает увеличенное изображение;							
Pan	Инструмент перемещения, позволяет перемещать видимую область изображения;							
One View	Устанавливает режим отображения, при котором в Области анализа фреймов отображается один фрейм данных;							
Tow View	Устанавливает режим отображения, при котором Область анализа фреймов разбивается на две секции. В каждой секции отображается один фрейм данных, при условии, что в дереве фреймов выделено не менее двух фреймов;							
Four View	Устанавливает режим, при котором Область анализа фреймов разбивается на четыре секции, в каждой секции может отображаться один фрейм данных, при условии, что в Дереве фреймов выделено не менее трех фреймов.							

# 1.2.4. Меню Filters, Analysis

Меню **Filters** и **Analysis** содержат группы методов, которые обеспечивают обработку (преобразование, фильтрацию, редактирование) и анализ СЗМ-данных. Более подробное рассмотрение данных методов производится ниже, в разделе <u>1.7</u> «Фильтры» на стр. <u>49</u> и в разделе <u>2</u> «Анализ и обработка данных» на стр. <u>63</u>)

#### 1.2.5. Меню Measurement

Меню **Measurement** содержит ряд инструментов для простых измерений (Рис. 1-6):



Рис. 1-6. Меню Measurement

Табл. 1-3. Команды меню Measurement

Line	Измерение расстояния между двумя точками изображения.
Angle	Измерение угла между двумя выбранными направлениями.
Point	Измерение координат точки, выбранной на изображении.

## 1.2.6. Меню Report

Меню Report содержит команды для работы с генератором отчетов (Рис. 1-7):



Рис. 1-7. Меню Report

# 1.2.7. Меню Неір

Меню Нер (Рис.1-8) содержит команды:

Report	Help	
	0	Iontent
	ļ	About

Рис.1-8. Меню Нер

**Contents** – открывает файл справки;

About – открывает окно About Image Analysis

## 1.2.8. ІА Р9 Hot Keys Form - окно настройки горячих клавиш

«Горячие клавиши» представляют собой определенные комбинации клавиш. Каждой такой комбинации клавиш соответствует определенная команда или метод обработки, которые напрямую запускаются при наборе комбинации.

Для открытия окна настройки горячих клавиш **IAP9 Hot Keys Form** следует выбрать в меню **File** пункт **Hot Keys list** (Puc.1-9):

File	Edit	View	Filters	Analysis	Measurement	Report	Help			
	Open Ctrl+O									
	Close File									
	Save All Frames Ctrl+S									
	Save 3	Selecte	d Frame:	5						
	Save I	Results								
	Save F	Frames	with Res	sults						
	Expor	t								
	Delete selected frames Ctrl+Del									
	Delete	e Result	5							
	Clear All									
	Properties Ctrl+P									
	Hot ke	eys list				Ctrl+	ŀН			
				- VE .						

Рис.1-9. Открытие окна настройки горячих клавиш

В верхней части окна **IAP9 Hot Keys Form** содержится список команд и соответствующие этим командам комбинации горячих клавиш (Рис. 1-10).

В нижней части содержится список комбинаций клавиш и соответствующие этим комбинациям методы обработки или анализа. Этот список является настраиваемым.

IAP9HotKe	ysForm		_ 🗆 🗵	
Open file	Ctrl+0			
Save all		Ctrl+S		
Select all		Ctrl+A		
Delete frame		Ctrl+Del		
Frame propertie	s	Ctrl+P		
Open recovery f	file	Alt+Shift+	o	
Rename frame		F2		
Hot keys list		Ctrl+H		
Select met	hods for the	se combin	ations:	
Alt 12	r Fit Lines by Ar	~~	-	
AILTZ		ca	<u> </u>	
Alt+3	Roughness Ar	alysis	<b>-</b>	
Alt+4	FFT Analysis		•	
Alt+5	FFTFilteration		•	
		C	lose	

Рис. 1-10. Окно настройки горячих клавиш

По желанию, любой комбинации клавиш из этого списка можно поставить в соответствие любой метод из списка методов (Рис. 1-11)

Select methods for these combinations:							
Alt+1	Subtract Surface	R					
Alt+2	Simple Section Section Analysis	Ĥ					
Alt+3	Sobel horizontal Sobel vertical						
Alt+4	Subtract Surface Three Points Leveling						
Alt+5	Uniform 5x5	•					

Рис. 1-11. Открытие списка методов

# 1.2.9. Открытие файлов данных

Файл СЗМ-данных формата MDT состоит из одного или нескольких фреймов. Каждый фрейм является элементарным фрагментом данных, который соответствует либо отдельному СЗМ изображению: одномерному (1D-данные), двумерному (2D-данные) или трехмерному, либо отдельному фрагменту текстовых данных.

Для открытия файла данных следует:

- 1. Выбрать команду меню File ==> Open;
- 2. В открывшемся диалоговом окне **Open** (Рис.1-12) выбрать необходимый файл данных в списке файлов;
- 3. Дважды щелкнуть на названии выбранного файла, либо нажать на кнопку **Open**.

👰 Open						×
Folders	←	🛅 grain		•	D	Search
minimum december of the second december of	▲ ↓ ▶	Name 0-3F-C7-1.mdt 0F-Add Z Points.mdt 0F-C7-1.mdt 0Inverse data.mdt 0-lat.mdt 1grain.mdt 02F-C7-1.mdt		Size 461 KB 864 KB 471 KB 103 KB 2 221 KB 12 KB 220 KB	Type SPM Data File - list . SPM Data File - list .	Date Modil            18.01.200            06.11.200            22.04.200            18.01.200            18.01.200            18.01.200            18.01.200            18.01.200            17.11.200            05.11.200            18.01.200
magnetic_domains.mdt opal_matrix2.mdt	←	Frames		594 KB	SPM Data File - list .	27.10.200 - 
		Name Flag	 2x1 μ 2x1 μ 2x1 μ	im (239x225), STM im (478x450), STM im (956x900), STM	<nt-mdt>, Mod.:Off <nt-mdt>, Mod.:Off <nt-mdt>, Mod.:Off</nt-mdt></nt-mdt></nt-mdt>	Created 09.03.2005 09:43 17.11.2008 13:28 17.11.2008 13:28
File name 0-lat.mdt Files of type All SPM formats		• •		[	Open	Cancel

Рис.1-12. Выбор файла данных

В результате открытия файла данных (Рис. 1-13):

- в дереве методов отображаются фреймы, содержащиеся в файле данных;
- в области анализа фреймов отображается первый фрейм файла данных;
- в верхней части области анализа фреймов появляется вкладка с названием открытого файла (Рис. 1-14).



Рис. 1-13. Результат открытия файла данных



Рис. 1-14. Вкладка с названием файла

Аналогичным образом можно открыть второй и последующие файлы данных. При окрытии очередного файла (Рис. 1-15):

- в области анализа фреймов добавляется вкладка с названием файла, эта вкладка является выделенной,
- в области анализа фреймов отображается первый фрейм файла,
- а в дереве фреймов отображаются фреймы, содержащиеся в этом файле.



Рис. 1-15. Открытие очередного файла данных (magnetic\_domains.mdt)

# 1.3. Область анализа фреймов и дерево фреймов

#### 1.3.1. Вкладки области анализа фреймов

Если открыто несколько файлов данных, то в области анализа фреймов имеются вкладки, каждая из которых соответствует определенному файлу и имеет его имя. На примере (Рис. 1-16) имеется четыре вкладки, что соответствует четырем открытым файлам. Одна из вкладок всегда находится в выделенном состоянии, на примере (Рис. 1-16) это вкладка, соответствующая файлу magnetic domains.mdt.



Рис. 1-16. Вкладки области анализа фреймов

Файл, соответствующий выделенной вкладке, является выделенным: фреймы этого файла отображаются в дереве фреймов, а фрейм, выделенный в дереве фреймов, отображается в области анализа фреймов. На примере (Puc. 1-16) выбран файл magnetic\_domains.mdt, в дереве фреймов отображаются фреймы этого файла, а в области анализа фреймов отображается фрейм, выделенный в дереве фреймов – это второй фрейм из дерева.

Выделение нужного файла производится щелчком курсора мыши на вкладку с именем файла.

# 1.3.2. Дерево фреймов

В дереве фреймов отображаются фреймы файла, соответствующего вкладке, выбранной в области анализа фреймов.

Один из фреймов является выделенным. Выделенный фрейм отрображается в области анализа фреймов.

При щелчке левой кнопкой на любой фрейм, выделение переносится на этот фрейм, при этом снимается выделение с других фреймов.

Можно последовательно выделить несколько фреймов, щелкая с нажатой клавишей <Ctrl> на очередной фрейм.

# 1.3.3. Фреймы первого и второго уровня

Упоминавшиеся выше фреймы данных, т.е. элементарные фрагменты данных, из которых состоит файл формата MDT, являются фреймами первого уровня. На Рис.1-17 показан пример фреймов первого уровня в Дереве фреймов.



Рис.1-17. Фреймы первого уровня в Дереве фреймов

Кроме фреймов первого уровня, в Дереве фреймов могут существовать фреймы второго уровня (присоединенные фреймы). Эти фреймы возникают в результате применения различных методов обработки и анализа к фреймам первого уровня и являются присоединенными к фреймам первого уровня (Рис.1-18). На Рис.1-18, в Дереве фреймов, первый фрейм, являющийся фреймом первого уровня, имеет два присоединенных фрейма.



Рис.1-18. Пример фреймов второго уровня, присоединенных к первому фрейму

Любой фрейм второго уровня можно преобразовать во фрейм первого уровня. Для этого следует:

1. Поместить курсор на выбранный присоединенный фрейм и щелкнуть правой кнопкой (Рис.1-19).



Рис.1-19. Выбор необходимого присоединенного фрейма

2. В открывшемся списке навести курсор на команду **Derive Frame from**. Щелкнуть мышью на появившемся справа меню с названием типа будущего фрейма первого уровня.



Рис. 1-20. Выбор команды Derive Frame from

В результате в Дереве фреймов появится новый фрейм первого уровня (Рис. 1-21), являющийся копией преобразованного присоединенного фрейма.



Рис. 1-21. Появление нового фрейма первого уровня в Дереве фреймов

# 1.3.4. Сохранение фреймов

Любой фрейм первого уровня можно сохранить в выбранный, либо отдельный файл.

Для этого следует выполнить следующие действия:

- 1. Выделить фрейм в Дереве фреймов, посредством щелчка левой кнопкой.
- 2. Выбрать команду меню File → Save Selected Frames...

File	Edit	View	Filters	Analysis	Measur
	Open.			Ctrl	+0
	Save /	All Fran	nes	Ctr	l+s
Save Selected Frames					
	Save I	2 ecults		•	5

Рис.1-22. Выбор команды Save Selected Frames

3. В открывшемся диалоговом окне сохранить файл стандартным образом.

# 1.3.5. Область анализа фреймов: режимы отображения One Frame, Two Frames, Four Frames

В зависимости от количества фреймов, выделенных в Дереве фреймов, и от выбранной команды (**One Frame**, **Two Frames**, **Four Frames**), возможны три режима отображения:

One Frame	<ul> <li>в Области анализа отображается один фрейм</li> </ul>
Two Frames	<ul> <li>Область анализа разделена на две секции, в каждой отображается один фрейм</li> </ul>

Four Frames – Область анализа разделена на четыре секции, в каждой секции может отображаться один фрейм

#### **Опе Frame** – отображение одного фрейма

По умолчанию, если в Дереве фреймов имеется один выделенный фрейм данных, то автоматически устанавливается режим **One Frame**, и в Области анализа отображается этот выделенный фрейм (Puc.1-23).



Рис.1-23. Режим One Frame

#### <u>Тwo Frames – отображение двух фреймов</u>

Для перехода в режим **Two Frames** необходимо: выделить в Дереве фреймов два или больше фреймов, и выбрать команду **Two Frames** на панели инструментов (Рис. 1-24) или в меню **View** (Рис. 1-25).



Рис. 1-24. Выбор команды Two Frames на панели инструментов



Рис. 1-25. Выбор команды Two Frames в меню View

В режиме отображения **Two Frames**, Область анализа разделена на две секции, в каждой из которых отображается один фрейм (Рис. 1-26).



Рис. 1-26. Режим отображения Two Frames

Порядок расположения фреймов в Области анализа соответствует порядку их выделения в Дереве фреймов. Если в Дереве фреймов было выделено больше двух фреймов, то отображаться будут первые два фрейма.

Одна и только одна из секций Области анализа (по умолчанию левая) является активированной. Если щелкнуть левой кнопкой мыши на не активированной секции Области анализа, то она станет активированной, а первой активация снимется.

Если перейти в Дерево фреймов и щелкнуть на каком-либо фрейме, то этот фрейм выделится, со всех других фреймов снимется выделение, и этот вновь выделенный фрейм отобразится в активированной секции Области анализа. Состояние второй секции Области анализа (не активированной) остается при этом неизменным, т.е. в ней будет отображаться первоначальный фрейм.

Таким образом, последовательно щелкая на нужные фреймы в Дереве фреймов, можно организовать просмотр необходимых фреймов в активированной секции

Области анализа фреймов и установить в ней любой фрейм. Затем можно перейти на не активированную секцию Области анализа, активировать ее и, руководствуясь описанной выше процедурой, установит в ней любой фрейм.

#### Four Frames – отображение четырех фреймов

Для перехода в режим **Four Frames** (Рис. 1-27) необходимо, аналогично режиму **Two Frames**: выделить в Дереве фреймов три или больше фреймов, и выбрать команду **Four Frames** либо на панели инструментов (Рис. 1-24), либо в меню **View** (Рис. 1-25).



Рис. 1-27. Режим отображения Four Frames

В режиме отображения **Four Frames**, Область анализа разделена на четыре секции, в каждой из которых может отображаться один фрейм.

Порядок расположения фреймов в Области анализа соответствует порядку их выделения в Дереве фреймов. На примере Рис. 1-27 фреймы выделялись в последовательности 1, 4, 2, 3.

Аналогично режиму **Two Frames**, одна из секций Области анализа (по умолчанию верхняя левая) является активированной. Логика работы с активированной секцией Области анализа и связь с Деревом фреймов, аналогична рассмотренному выше режиму **Two Frames**.

## 1.3.6. Изменение шкалы по Z

Для включения инструментов регулировки нижнего и верхнего уровней отображаемой шкалы по Z (уровней цветопередачи) следует поставить курсор на столбик палитры (Рис. 1-28) и дважды щелкнуть левой кнопкой мыши.



Рис. 1-28. Установка курсора на столбик палитры

При помощи появившихся маркеров-ползунков (Рис. 1-29) можно регулировать верхний и нижний уровни отображаемого интервала Z шкалы



Рис. 1-29. Регулировка верхнего уровня Z шкалы

Настройка параметров маркеров-ползунков верхнего и нижнего уровней Z шкалы производится в диалоговом окне Setting Dialog (Рис. 1-30) в пункте Z-Slider. диалоговое

окно Setting Dialog открывается кнопкой 🔯 Viewer Settings на панели инструментов.

Settings Dialog		×
😂 🖶 🗾 🛼		
2D		
<b>∃</b> Fonts & Colors		
<b></b> • Axes		
<b>⊞ Active frame</b>		
RZ-Slider		
ド Z-Slider visible	✓	
Min Z-Slider Back color	📕 RGB( 165, 163, 227 )	
Min Z-Slider Line color	Elue	
Min Z-Slider Text color	White	
Max Z-Slider Back color	📕 RGB( 241, 163, 151 )	
Max Z-Slider Line color	E Red	
Max Z-Slider Text color	White	
∃3D Mode		
Measuring Tools		
🗄 Angle Scan Select		
	OK Cancel	

Рис. 1-30. Настройка параметров маркеров регулировки верхнего и нижнего уровней Z-шкалы

# 1.3.7. Синхронизация раскраски палитр

При работе в режимах режиме **Two Frames** или **Four Frames** можно включить синхронизацию палитр всех изображений отображаемых в области анализа.

Для включения синхронизации следует нажать кнопку **Synchronize palettes** на панели инструментов.

В результате (Рис. 1-31):

- на всех изображениях включаются инструменты регулировки уровней шкалы по Z (на столбиках палитры появляются маркеры-ползунки), эти инструменты являются синхронизованными – все маркеры верхнего (нижнего) уровня имеют одинаковые значения;
- появляется панель управления синхронизацией палитр (Synchronize Palette).
   Уровни маркерных линий на гистограмме синхронизованы с маркерамиползунками на столбиках палитр Z-шкал изображений.



Рис. 1-31. Результат включения синхронизации палитр

Положение уровней Z-шкал можно изменять:

- посредством перемещения маркеров-ползунков на столбиках палитр Z-шкал изображений,
- посредством перемещения маркерных линий на гистограмме (Рис. 1-32)



Рис. 1-32. Изменение положения верхних уровней Z-шкал посредством перемещения правой маркерной линии гистограммы

# 1.4. Панель инструментов

Панель инструментов (Рис. 1-1) содержит элементы управления, список которых и выполняемые функции приведены ниже в таблице.

Табл. 1-4. Кнопки панели инструментов

Open (Ctrl+O)	Открывает диалоговое окно для выбора и загрузки необходимого файла.
Save All Frame (Ctrl+S)	Сохраняет все фреймы данных, находящиеся в дереве фреймов, в качестве нового файла данных.
One Frame	Устанавливает режим отображения, при котором в Области анализа отображается один фрейм данных.
Two Frames	Устанавливает режим отображения, при котором Область анализа разделена на две секции. В каждой секции может отображаться один фрейм, при условии, что в Дереве фреймов выделено не меньше двух фреймов.

Four Frames	Устанавливает режим отображения, при котором Область анализа разделена на четыре секции. В каждой секции может отображаться один фрейм, при условии, что в Дереве фреймов выделено не меньше трех фреймов.	
Synchronize palettes	Синхронизует работу инструментов <b>Z Coloration</b> (ручной настройки контраста изображения) всех фреймов Области анализа. Работает только в режимах <b>Two Frames</b> и <b>Four Frames</b> .	
Arrow	Отменяет действие выбранного ранее инструмента	
Coom In	Инструмент увеличения, увеличивает выделенный фрагмент изображения.	
<b>Q</b> Zoom Out	Инструмент уменьшения, уменьшает увеличенное изображение.	
Move Visible Area	Инструмент перемещения, позволяет перемещать видимую Область изображения.	
4 Crop	Инструмент кадрирования изображения, вырезает выделенную часть изображения и удаляет остаток.	
Line	Инструмент измерения расстояния между двумя точками изображения.	
Angle	Инструмент измерения угла между двумя выбранными направлениями.	
Point	Инструмент измерения координат точки, выбранной на изображении.	
Edit Note	Открывает диалоговое окно Add Note To Frames, которое позволяет добавлять комментарии к фрейму.	
Simple Section	Позволяет получать профиль сечения вдоль заданной на изображении линии.	
3D Light	Включает/выключает источник света, освещающий 3D-изображение из выбранной точки. Работает только с 3D-изображением.	
Viewer Settings	Открывает диалоговое окно <b>Setting Dialog</b> для настройки интерфейса панели отображения 2D-данных (1D-данных).	
Load Palette	Открывает диалоговое окно <b>Open</b> , позволяющее выбрать необходимую палитру.	
Open Report	Открывает генератор отчетов.	
Save as Image	Сохраняет изображение, находящееся в активированной части Области анализа, в качестве графического файла.	

# 1.5. Организация методов анализа и обработки СЗМ-изображений

Методы анализа и обработки можно применять к фрейму данных, отображаемому в Области анализа. Если в Области анализа отображается несколько фреймов (режимы **Two Frames**, **Four Frames**), то методы анализа и обработки применимы к активированному изображению, т.е. к фрейму находящемуся в активированной секции Области анализа. Напомним, что активация производится щелчком левой кнопки мыши на необходимом фрейме в Области анализа.

Некоторые методы анализа позволяют запускать т.н. потоковую обработку данных, т.е. выделив несколько фреймов, можно запускать их в одном окне метода.

По принципу организации все методы разделены на две группы.

В первую группу входят фильтры и «простые методы», такие как инструменты **Point**, **Line**, **Angle** (геометрические измерения), методы **Simple Section**, **Crop**. Применение методов этой группы производится непосредственно в главном окне программы – в этом основное отличие от методов первой группы.

Активация простых методов производится посредством соответствующей кнопки на панели инструментов главного окна. Применение и настройка простых методов рассматривается ниже в разделе <u>1.6</u> «Применение простых методов анализа» на стр. <u>28</u>. Применение фильтров рассматривается в разделе <u>1.7</u> Фильтры на стр. <u>49</u>.

Вторую группу можно условно назвать «сложные методы». При активации любого из этих методов открывается дополнительное окно – «окно соответствующего метода», в котором и производится обработка или анализ исходного фрейма. Подробно работа этих методов рассматривается в разделе <u>2</u> «Анализ и обработка данных» на стр. <u>63</u>. Активация этих методов производится через Дерево методов, либо через меню **Analysis** в главном меню.

# 1.6. Применение простых методов анализа

# 1.6.1. Инструменты Point, Line, Angle - работа и настройка

Инструменты **Point, Line, Angle** являются однотипными, поэтому подробно рассмотрим работу и настройку одного инструмента – **Point**.

#### 1.6.1.1. Работа инструмента Point

Инструмент **Point** служит для измерения координат точки, выбранной на изображении.

Для активации инструмента необходимо нажать кнопку **Point** на панели инструментов (Рис. 1-33).



Рис. 1-33. Активация инструмента Point

Затем, следует поместить курсор в нужную точку на СЗМ-изображении (Рис. 1-34) и щелкнуть левой кнопкой мыши.



Рис. 1-34. Выбор нужной точки на изображении

В результате на месте выбранной точки появится маркер (в виде креста в примере, приведенном на Рис. 1-35). Через маркер проходят две пересекающиеся линии, горизонтальная и вертикальная. Также появляется надпись, в которой содержатся: обозначение точки (первая буква) и значения координат точки по осям *X*, *Y*, *Z*. Параметры маркера и выводимой надписи можно настраивать (см. п. <u>1.6.1.2</u> «Настройка инструмента Point» на стр. <u>31</u>).



Рис. 1-35. Маркер с координатами выбранной точки

Кроме этого, координаты точки отображаются в Области результатов измерения (Рис.1-36).



Область результатов измерения

Рис.1-36. Отображение координат точки в Области результатов измерения

Маркер можно перемещать. Для этого следует подвести курсор к маркеру, либо к вертикальной или горизонтальной линии, нажать левую кнопку мыши и перемесить маркер в нужную точку, затем отпустить кнопку мыши.

Если курсор переместить в другую точку и щелкнуть левой кнопкой мыши, то маркер скачком переместится в эту новую точку.

#### Многократное использование инструмента Point

Если инструмент уже применен, и на изображении имеется точка, отмеченная маркером, то можно дополнительно к первой выделить новую точку, не снимая выделения с предыдущей точки.

Для выделения дополнительной точки следует переместить маркер в новую точку и щелкнуть левой кнопкой мыши при нажатой клавише <Ctrl> (Puc.1-37).



Рис.1-37. Выделение второй точки

Последовательно применяя эту процедуру, можно выделить сколько угодно точек (Рис.1-38).



Рис.1-38. Пример многократного использования инструмента Point

# 1.6.1.2. Настройка инструмента Point

Можно настраивать параметры маркера (маркер с пересекающимися линиями, маркер без линий, цвет, толщина линий), а также параметры отображаемой надписи (шрифт, цвет, выводимые значения и т.д.).

Настройка параметров инструмента **Point** производится в диалоговом окне **Setting Dialog** в пункте **Point Tool**. Для доступа к настройке инструмента **Point c**ледует:

1. Нажать кнопку Viewer Settings на панели инструментов (Puc.1-39) для открытия диалогового окна Setting Dialog.



Рис.1-39. Открытие диалогового окна Setting Dialog

2. В открывшемся диалоговом окне **Setting Dialog** выбрать пункт **Measuring Tools**, при необходимости раскрыть его список (Puc.1-40).



Рис.1-40. Выбор пункта **Measuring Tools** 

3. Выбрать пункт Point Tool, раскрыть его список (Рис.1-41).



Рис.1-41. Выбор пункта **Point Tool** 

Point Tool содержит следующий список:

- Wide Sight;
- Limits Mode;
- Vertex Image;
- Line Image;
- Caption.

#### Wide Sight

Wide Sight - включает/выключает отображение перпендикулярных линий, проходящих через маркер (Рис.1-42).



Рис.1-42. Параметр Wide Sight включает-выключает отображение перпендикулярных линий, проходящих через маркер

## Limits Mode

Limits Mode – устанавливает область на дисплее, в пределах которой может перемещаться маркер инструмента. Возможны несколько режимов (Puc.1-43):

□Point Tool	
Wide Sight	
Limits Mode	Frame Rect
🗄 Vertex Image	None
<b>∃Line Image</b>	Max Visible Rect
+ Caption	Defined Data Rect

Рис.1-43. Возможные режимы Limits Mode

#### Vertex Image

**Vertex Image** – настройка параметров маркера. Содержит следующий список параметров (Рис.1-44):

🖓 Vertex Image				
ん Name	+ Cross			
Size	21			
Line Width	1			
Smoothing				
Active Tool Colors				
HotTracked Tool Colors				

Рис.1-44. Список пункта vertex image	Рис.1-44.	4. Список пунк	ra Vertex	Image
--------------------------------------	-----------	----------------	-----------	-------

- Name – выбор типа маркера (Рис.1-45)

🗆 Vertex Image	
Name	+Cross
Size	□ Square
Line Width	
Smoothing	+ Cross
	×Dagger
HotTracked Tool Colors	1 Stroke

Рис.1-45. Выбор типа маркера

- Size – выбор размера маркера (Рис.1-46)

🗆 Vertex Image		
Name	+ Cross	
Size	21	\$
Line Width	1	NC

Рис.1-46. Выбор размера маркера

- Line Width – выбор толщины линии маркера

🗆 Vertex Image	
Name	+ Cross
Size	21
Line Width	1 4
Smoothing	

Рис.1-47. Выбор толщины линии маркера

- Smoothing – включение/выключение режима сглаживания линий маркера

Active Tool Colors – настройка цветовых параметров активного маркера (Рис.1-48)

	Active Tool Colors	
A(1 185 0 738 10 39)	K Color	📘 Aqua
A(1,100,0,100,10,00)	Alpha	1,00
	Background Color	Navy
	Background Alpha	0,20

Рис.1-48. Параметры настройки цвета активного маркера

- Color – выбор цвета активного маркера

A(1 185 0 738 10 39)	□ Active Tool Colors			
A(1,100,0,130,10,30)	Color	📃 Aqua	Ν	
	Alpha	1,00	43	

Рис.1-49. Выбор цвета маркера

**Hot Tracked Tool Colors** – настройка цветовых параметров маркера в режиме, когда маркер захватывается курсором (Рис.1-50)



Рис.1-50. Выбор цвета маркера в режиме, когда маркер захватывается курсором.

Not Active Tool Colors – настройка цветовых параметров маркера в режиме, когда маркер является не активированным. Не активированный маркер возникает, когда инструмент Point используется многократно. В этом случае, возникший новый маркер будет активированным, а предыдущий маркер остается, но становится не активированным. На Puc.1-51 не активированный маркер имеет желтый цвет (Yellow).

A (1,207, 0,761, 13,6)	⊡Not Active Tool Colors	
	Color	🗌 Yellow 📐 😐
B (1.369, 0.591, 9,9)	Alpha	0,60 5
	Background Color	Navy
	Background Alpha	0,20

Рис.1-51. Выбор цвета не активированного маркера

#### Line Image

Line Image – настройка параметров перпендикулярных линий, проходящих через маркер. Содержит следующий список параметров (Рис.1-52):

⊟Line Image	
<sup>KC</sup> Line Width	1
Smoothing	$\checkmark$
Active Tool Colors	
⊞HotTracked Tool Co	lors
	ors

Рис.1-52. Список параметров настройки пересекающихся линий маркера

- Line Width - выбор толщины пересекающихся линий.

	🗆 Line Image				🗆 Line Image		
264, 0,737, 21,67)	Line Width	þ	÷.	264, 0,737, 21,67)	Line Width	β	<b>₹</b>
	Smoothing	~	-10		Smoothing	<b>v</b>	

Рис.1-53. Выбор толщины пересекающихся линий маркера

 Smoothing – включение/выключение режима сглаживания пересекающихся линий маркера.

**Active Tool Colors** – настройка цветовых параметров пересекающихся линий активного маркера (Puc.1-54).



Рис.1-54. Настройка цветовых параметров пересекающихся линий активного маркера

- Color – выбор цвета пересекающихся линий активного маркера

	□ Active Tool Colors		
, 0,871, 27,98)	Color	📕 Teal	7
100 C 100	Alpha	1,00	N

Рис.1-55. Выбор цвета пересекающихся линий активного маркера

**Hot Tracked Tool Colors** – выбор цвета линии в режиме, когда линия захватывается курсором (Рис.1-56)

	HotTracked Tool Colors	
A (1.186, 0.928, 20,6)	Color 🗌 White 📐	
	Alpha 1,00 년	
	Background Color 📃 Navy	
	Background Alpha 0,20	

Рис.1-56. Выбор цвета пересекающихся линий, в режиме, когда линия захватывается курсором

Not Active Tool Colors – выбор цвета пересекающихся линий не активированного маркера (Рис.1-57). Не активированный маркер возникает, когда инструмент применяется многократно. В этом случае, возникший новый маркер будет активированным, а предыдущий маркер не активированным.

A (1,186, 0,928, 20,6)	Not Active Tool Colors			
	Color	🗌 Yellow	Ν	
B (1,324, 0,774, 20,0)	Alpha	0,50	43	
	⊡Caption			

Рис.1-57. Выбор цвета линий не активированного маркера

#### **Caption**

**Caption** – настройка параметров надписи. Содержит следующий список (Рис.1-58):

Caption		▲
ん Visible	<b>v</b>	
Name Visible	<b>v</b>	
Initial Value	A	
Prefix Visible	<b>v</b>	
Prefix		
Suffix Visible	<b>v</b>	
Suffix		
Horizontal Gap	0	
Vertical Gap	0	
Smoothing	<b>v</b>	
∃Font		
Parameters Visible	<b>v</b>	
<b></b> ■ Parameter 2		
🗄 Parameter 3		

Рис.1-58. Список пункта Caption

- Visible – включает/выключает отображение надписи (Рис.1-59).



Рис.1-59. Действие переключателя Visible

 Name Visible – включает/выключает отображение названия и маркировки точки (Рис.1-60)




- Initial Value название и маркировка выбранной точки
- Prefix Visible включает/выключает отображение надписи, стоящей перед названием

Prefix – создание и редактирование надписи, стоящей перед названием

Suffix Visible – включает/выключает отображение надписи, стоящей после названия и маркировки

- Suffix надпись, стоящая после названия и маркировки
- Horizontal Gap горизонтальный интервал между маркером и надписью
- Vertical Gap вертикальный интервал между маркером и надписью
- Smoothing включает/выключает режим сглаживания элементов надписи

**Font** – настройка параметров шрифта надписи. Список пункта **Font** содержит стандартный набор параметров (Рис. 1-61)

Font	
Name	Arial
Size	9
Color	White
Alpha	1,00
⊡Style	[Italic]
Bold	
Italic	

Рис. 1-61. Настройка параметров шрифта надписи

**Parameters Visible -** включает/выключает отображение значений выводимых параметров (значений координат точки)

 - Parameter 1 - настройка параметров первой выводимой величины (координаты X) (Puc.1-62)

Parameter 1	
Visible	
From new line	
Name	x
Show Unit	
Prefix Visible	<b>v</b>
Prefix	(X =
Suffix Visible	<b>v</b>
Suffix	,

Рис.1-62. Список параметров для настройки первой выводимой величины – координаты X

Список параметров пункта Parameter 1 (Рис.1-62):

 Visible - включает/выключает отображение значения первого параметра, в нашем случае X - координаты точки (Рис.1-63)



Рис.1-63. Включение/выключение отображения значения первого параметра

 From new line - включает/выключает отображение значений координат с новой строки (Рис.1-64)



Рис.1-64. Включение/выключение отображения значения параметра с новой строки

 Name – выбор координаты, которая соответствует первому отображаемому параметру. Можно выбрать любую из трех координат. Если выбран пункт None, то первый параметр отображаться не будет.



Рис.1-65. Выбор координаты, которая соответствует первому отображаемому параметру

 Show Unit - включает/выключает отображение единиц измерения значений первого параметра (Рис.1-66)



Рис.1-66. Включение/выключение отображения единиц измерения значений первого параметра

- Prefix Visible включает/выключает отображение надписи, стоящей перед значением первого параметра
- **Prefix -** надпись, стоящая перед значением первого параметра

Suffix Visible – включает/выключает отображение надписи, стоящей после значения и единиц измерения первого параметра

Suffix – надпись, стоящая после значения и единиц измерения первого параметра

 – Parameter 2 - настройка параметров второй выводимой величины (координаты Y)

Список пункта Parameter 2 такой же, как и список пункта Parameter 1.

- **Parameter 3** - настройка параметров третьей выводимой величины (координаты Z)

Список пункта Parameter 3 такой же, как и список пункта Parameter 1.

#### 1.6.1.3. Работа инструмента Line

Инструмент Line служит для измерения расстояния между двумя выбранными точками.

Для использования инструмента Line следует выполнить следующие действия:

- 1. Активировать инструмент нажатием кнопки 🖾 Line на панели инструментов.
- 2. Поместить курсор мыши в первую точку на изображении.
- 3. Нажать левую кнопку мыши и, удерживая ее, начать перемещать курсор. При нажатии кнопки начальная точка помечается маркером, при перемещении курсора возникнет второй маркер, связанный с курсором и линия, соединяющая этот маркер с маркером первой точки. Рядом с линией отображается надпись, которая содержит маркировку линии и значение расстояния между точками на изображении, лежащими на концах линии: первая величина соответствует расстоянию между точками в плоскости ХҮ, вторая – расстоянию в 3D пространстве.



Рис.1-67. Выбор первой и второй точек на изображении

- 4. Зафиксировать вторую точку линии:
  - Если остановить курсор в некоторой выбранной точке и отпустить левую кнопку мыши, то произойдет фиксация линии.
  - Если левую кнопку отпустить в процессе движения курсора, то линия становится привязанной к курсору. При этом курсор можно перемещать и останавливать, «привязка» линии к курсору сохраняется. Чтобы снять «привязку» линии к курсору, следует остановить курсор в выбранной точке и щелкнуть левой кнопкой мыши. При этом произойдет фиксация линии.

Линию можно перемешать целиком, не меняя ее длину и ориентацию, зацепив ее курсором, нажав и удерживая нажатой левую кнопку мыши (Рис.1-68). Если при этом в процессе движения отпустить кнопку, линия остается привязанной к курсору.



Рис.1-68. Перемещение линии целиком

В этом случае для снятия «привязки» линии к курсору следует остановить курсор и щелкнуть левой кнопкой мыши. Произойдет фиксация линии.

Если перемещать линию курсором, удерживая левую кнопку мыши нажатой, то при остановке курсора и отпускании кнопки произойдет фиксация линии.

Линию можно изменять, захватив курсором за любой из концов, и растягивая ее длину или вращая относительно другого конца (Рис. 1-69).



Рис. 1-69. Изменение длины линии

## 1.6.1.4. Настройка инструмента Line

Для инструмента Line можно настраивать:

- параметры маркеров (вид маркера, размеры, цвета);
- параметры соединительной линии (цвета, толщина);
- параметры отображаемой надписи (шрифт, цвет, обозначение, маркировка, выводимые параметры и т.д.).

Настройка аналогична настройке инструмента **Point**, последняя подробно изложена выше в п. <u>1.6.1.2</u> «Настройка инструмента Point» на стр. <u>31</u>.

Настройка параметров инструмента Line производится в диалоговом окне Setting Dialog в пункте Length Tool.

Чтобы открыть пункт Length Tool выполните последовательность действий:

- 1. Откройте диалоговое окно Setting Dialog кнопкой 🖾 Viewer Settings на панели инструментов.
- 2. Выберите пункт списка Measuring Tools → Length Tool (Pис.1-70).

Settings Dialog	×
2D	
<b>∃</b> Z-Slider	
∃3D Mode	
⊡Measuring Tools	
€ Show in modes []	
+ Point Tool	
⊡Length Tool	
र ⊉venter Length Tool	
🗄 Angle Tool	
± Section Tool	
Eenter Section Tool	
+ Y Section Tool	

Рис.1-70. Выбор в диалоговом окне пункта Length Tool

Length Tool содержит следующий список (Рис.1-71):

ELENGTH Tool	
ん Limits Mode	Frame Rect
🗄 Vertex Image	
±Line Image	

Рис.1-71. Список пункта Length Tool

Limit Mode – установка области на дисплее, в пределах которой могут перемещаться маркеры инструмента;

Vertex Image – настройка параметров маркеров;

Line Image – настройка параметров перпендикулярных линий;

Caption – настройка параметров надписи.

## 1.6.1.5. Работа инструмента Angle

Инструмент **Angle** служит для измерения угла между двумя выбранными направлениями.

Угол задается выбором трех точек на изображении. Первая точка – вершина угла, вторая и третья определяют направления лучей.

Для использования инструмента Angle следует выполнить следующие действия:

- 1. Активировать инструмент нажатием кнопки Angle на панели инструментов
- 2. Выбрать курсором на изображении первую точку. Щелкнуть левой кнопкой мыши, появится первый маркер вершина угла.



Рис.1-72. Выбор вершины угла

3. При последующем перемещении курсора возникнет второй маркер, связанный с курсором, и линия, соединяющая этот маркер с маркером вершины. Линия является отрезком первого луча угла.

Перемещая курсор, выбрать вторую точку, остановить курсор в этой точке и целкнуть левой кнопкой мыши. Произойдет фиксация второго маркера и соединяющей линии, т.е. фиксация первого луча угла.



Рис.1-73. Выбор первой стороны угла

4. При последующем перемещении курсора возникнет третий маркер, связанный с курсором и линия, соединяющая этот маркер с маркером вершины, линия является отрезком второго луча угла.

Перемещая курсор выбрать третью точку, остановить курсор в этой точке и щелкнуть левой кнопкой мыши. Произойдет фиксация третьего маркера и соединяющей линии, т.е. второго луча угла.



Рис.1-74. Выбор второй стороны угла

Направления лучей можно менять, зацепив курсором с нажатой левой кнопкой мыши соответствующий маркер луча или сторону луча и перемещая курсор. Аналогичным образом, можно менять положение вершины угла.

При манипуляциях с перемещениями действуют общие правила, аналогичные правилам для инструмента Line:

- если захватить объект курсором посредством нажатия левой кнопки, то его можно перемещать, удерживая кнопку нажатой. При остановке и последующем отпускании кнопки объект фиксируется;
- если при перемещении захваченного объекта отпустить кнопку в процессе движения, то объект остается привязанным к курсору. В этом случае фиксация произойдет только после остановки и щелчка левой кнопки мыши.

## 1.6.1.6. Настройка инструмента Angle

Для инструмента Angle можно настраивать:

- параметры маркеров (вид маркера, размеры, цвета);
- параметры соединительных линий (цвета, толщина);
- параметры отображаемой надписи (шрифт, цвет, обозначение, маркировка, выводимые параметры и т.д.).

Настройка параметров инструмента Angle производится в диалоговом окне Setting Dialog (открывается кнопкой 🐼) в пункте Angle Tool.

Чтобы открыть пункт Angle Tool выполните последовательность действий:

- 1. Откройте диалоговое окно Setting Dialog кнопкой 🖾 Viewer Settings на панели инструментов.
- 2. Выберите пункт списка Measuring Tools → Angle Tool (Puc. 1-75).

Настройка аналогична настройке инструмента **Point,** последняя подробно изложена выше в п. <u>1.6.1.2</u> «Настройка инструмента Point» на стр. <u>31</u>.

Settings Dialog	×
😂 🖬 🗾 📴	
2D	
+Z-Slider	
± 3D Mode	
⊡Measuring Tools	
Show in modes []	
±Point Tool	
⊞Length Tool	
Ecenter Length Tool	
Angle Tool	
분venter Angle Tool	
Section Tool	

Рис. 1-75. Выбор в диалоговом окне пункта Angle Tool

Angle Tool содержит следующий список (Рис.1-76):

Rangle Tool	
ド Wide Mode	
Limits Mode	Max Visible Rect
Align Angle Step	15,0
🗄 Vertex Image	
±Line Image	
	-

Рис.1-76. Список пункта Angle Tool

Wide Mode – выбор режима отображения лучей угла

Limit Mode – установка области на дисплее, в пределах которой могут перемещаться маркеры инструмента

Vertex Image – настройка параметров маркеров

Line Image – настройка параметров линий лучей угла

Caption – настройка параметров надписи

Действие параметра Wide Mode проиллюстрировано на Рис.1-77



Рис.1-77. Выбор режима отображения лучей угла

## 1.6.2. Simple Section – анализ профиля поверхности

Метод **Simple Section** позволяет получать кривые профиля поверхности для сечений вдоль заданных линий.

## 1.6.2.1. Работа метода Simple Section

Активация Simple Section производится нажатием кнопки Simple Section на панели инструментов главного окна (Рис.1-78).



Рис.1-78. Применение метода Simple Section

В результате:

- возникает линия сечения на СЗМ изображении
- появляется дополнительное окно Simple Section, в котором отображается график профиля поверхности вдоль линии сечения.

Линию сечения можно перемещать относительно изображения (параллельный перенос), захватив ее курсором в средней части.

Линию сечения можно изменять, захватив курсором за любой из концов, растягивая ее длину или вращая относительно другого конца.

Соответственно, при перемещении и изменении линии сечения будет меняться отображаемый график кривой, поскольку он соответствует текущей линии сечения.

#### 1.6.2.2. Настройка параметров линии сечения

Для линии сечения можно настраивать:

- параметры линии (цвета, толщина);
- параметры маркеров на концах линии (вид маркера, размеры, цвета);
- параметры отображаемой надписи (шрифт, цвет, обозначение, маркировка, выводимые параметры и т.д.).

Настройка параметров линии сечения производится в диалоговом окне **Setting Dialog** (открывается кнопкой 🐼) в пункте **Section Tool**.

Для доступа к настройкам инструмента Simple Section следует в диалоговом окне Setting Dialog выбрать пункт: Measuring Tools→ Section Tool.

Настройка параметров линии сечения аналогична настройке инструмента **Point**, последняя подробно изложена выше в п. <u>1.6.1.2</u> «Настройка инструмента Point» на стр. <u>31</u>.

## 1.6.2.3. Окно Simple Section

Окно **Simple Section** содержит стандартную панель 1D-данных (п. <u>2.1.2.2</u> «Панель 1D-данных» на стр. <u>66</u>), в которой отображается график кривой, соответствующей текущей линии сечения.

#### Сохранение 1D данных

Для сохранения, полученные 1D данные (график кривой сечения) следует отправить в Дерево фреймов качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (<u>1.3.4</u>. «Сохранение фреймов» на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку Sent Data на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку **OK** создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки **Sent Data**.
- Нажатие на кнопку OK+<Ctrl>+<Alt> создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

## 1.6.3. Сгор – инструмент кадрирования изображения

Сгор является инструментом кадрирования изображения. Он вырезает выделенный фрагмент изображения и на основе его создает новый фрейм.

## 1.6.3.1. Работа инструмента Сгор

Активация Сгор производится щелчком кнопки Сгор на панели инструментов главного окна (Рис. 1-79).



Рис. 1-79. Применение метода Сгор

В результате:

- на исходном изображении возникает выделенная область, имеющая стандартные размеры;
- появляется дополнительное окно **Сгор**, в котором отображается изображение, соответствующее выделенной области.

Размеры и положение выделенной области можно менять при помощи курсора (Рис. 1-80, Рис. 1-81).



Рис. 1-80. Изменение размеров выделенной области в вертикальном направлении



Рис. 1-81. Перемещение выделенной области

## 1.6.3.2. Сохранение полученных результатов

Для сохранения, полученные 2D данные (изображение выделенной области) следует отправить в Дерево фреймов качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (<u>1.3.4</u> Сохранение фреймов на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку Sent Data на панели инструментов - создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.

- Нажатие на кнопку ОК создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку OK+Ctrl является аналогом действия кнопки Sent Data.
- Нажатие на кнопку OK+Ctrl+Alt создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

## 1.7. Фильтры

Изображение является функцией двух пространственных координат. Обычно изображения, сформированные различными информационными системами, искажаются действием помех. Ослабление действия помех достигается фильтрацией.

При фильтрации значение функции (сигнала) в каждой точки исходного изображения, искаженного помехой, заменяется некоторым другим значением, которое признается в наименьшей степени искаженным помехой.

Идеология фильтрации основывается на рациональном использовании данных, как из рассматриваемой точки, так и из ее окрестности.

Программа **Image Analysis 3.5** обеспечивает фильтрацию изображений посредством применения основных стандартных фильтров, которые описываются ниже в настоящем разделе:

- линейных фильтров, содержащие три основные группы:
- сглаживающие фильтры;
- контрастирующие фильтры;
- градиентные фильтры;
- нелинейных фильтров (медианные фильтры).

#### 1.7.1. Применение стандартных фильтров

Применение стандартных фильтров производится непосредственно в главном окне программы к изображению, находящемуся в Области анализа в активированном состоянии.

Возможны два способа доступа к фильтрам: через главное меню и через панель управления фильтрами.

#### 1.7.1.1. Выбор фильтра через главное меню

Доступ к стандартным фильтрам двухступенчатый:

- 1. В меню **Filters** выбирается необходимая группа (Рис.1-82).
- 2. В этой группе выбирается нужный фильтр.

Меню Filters содержит следующий список групп фильтров (Рис.1-82):



Рис.1-82. Список меню Filters

- Non-linear - нелинейные фильтры (Рис.1-83):

File	Edit View	Filters	Analysis	Measurem	ent	Report	Help
	Frames	No	n-linear			Median 3	3x3
2	SER.	Ed	ge enhanc	ement V.		Median 5	ix5
		Sh	arpening	+		Median 7	'x7
F		Sm	oothing				
	1.Min Z I	Ot	her	•			ъ.

Рис.1-83. Список нелинейных фильтров

- Edge enhancement - градиентные (дифференцирующие) фильтры (Рис.1-84), используются для выделения границ объектов



Рис.1-84. Список градиентных фильтров

 Sharpening - контрастирующие фильтры (Рис.1-85), повышающие визуальную четкость изображения



Рис.1-85. Список контрастирующих фильтров



- Smoothing – сглаживающие фильтры (Рис.1-86)

Рис.1-86. Список сглаживающих фильтров

- Other – прочие фильтры

Для применения нужного фильтра следует выбрать курсором фильтр в списке соответствующей группы (на примере Рис.1-87 – это фильтр **High Pass 3x3** в группе **Sharpening**) и щелкнуть левой кнопкой мыши.



Рис.1-87. Пример выбора фильтра (High Pass 3x3)

В результате применения выбранного фильтра (на примере Рис.1-88 фильтр **High Pass 3x3**) происходит следующее:

- возникает новый фрейм данных, полученный из исходного в результате применения выбранного фильтра. Этот фрейм является присоединенным к исходному фрейму данных,
- в главном окне исходное изображение заменяется преобразованным изображением, которое соответствует фрейму, полученному в результате фильтрации;
- в списке примененных фильтров на панели управления фильтрами добавляется новый пункт с названием примененного фильтра (High Pass 3x3), этот пункт фактически является названием нового присоединенного фрейма. Он является выделенным.



Рис.1-88. Результат применения фильтра (High Pass 3x3)

Таким образом, в результате применения фильтра создается новый присоединенный фрейм, и этот фрейм отображается в главном окне вместо исходного.

К полученному фрейму можно применить следующий фильтр, действуя описанным выше образом. В результате возникнет новый присоединенный фрейм, его изображение будет отображаться в главном окне вместо предыдущего, а в списке примененных фильтров добавится пункт с названием последнего примененного фильтра, это название соответствует последнему полученному фрейму.

### 1.7.1.2. Операции со списком примененных фильтров

# Список примененных фильтров – список полученных присоединенных фреймов

В результате последовательного применения нескольких фильтров, на панели фильтров формируется список примененных фильтров (Рис. 1-89).

Ap	plied Filters Note					
	Source data	4				
	HighPass 3x3					
	Gaussian 3x3 0.391					
	LowPass 3x3 1.41					
	Prewitt vertical					

Рис. 1-89. Пример списка примененных фильтров

Первый пункт этого списка (**Source date**) соответствует исходному изображению (исходному фрейму). Каждому последующему пункту из этого списка соответствует присоединенный фрейм, полученный в результате последовательного применения к исходному фрейму цепочки фильтров, предшествующих этому пункту списка, с включением последнего.

Таким образом, список примененных фильтров является также списком полученных присоединенных фреймов.

#### Просмотр присоединенных фреймов

В главном окне отображается фрейм данных, соответствующий выделенному пункту списка. Выделяя нужный пункт списка, можно просматривать в главном окне любой присоединенный фрейм из списка. На примере Рис.1-90 выделен пункт Gaussian **3x3**, стоящий в списке третьим, соответственно, в главном окне отображается присоединенный фрейм, полученный из исходного в результате последовательного применения двух фильтров, High Pass **3x3** и Gaussian **3x3**.



Рис.1-90. Пример просмотра фрейма, соответствующего выделенному пункту

Если выделить первый пункт (**Source date**), то в главном окне отобразится исходное изображение (Puc.1-91).



Рис.1-91. Отображение исходного изображения при выделении первого пункта в списке

#### Удаление пунктов из списка примененных фильтров

Для удаления используется кнопка **Delete** на панели управления фильтрами (Рис. 1-92):



Рис. 1-92. Кнопка Delete для удаления пунктов из списка примененных фильтров

Если в списке выделен последний пункт, то при нажатии на кнопку **Delete** удаляется этот последний пункт списка примененных фильтров и соответствующий ему присоединенный фрейм данных.

Если выделенный пункт не является последним в списке, то при нажатии на кнопку **Delete** выделенный пункт остается, а удаляются все последующие пункты вместе с соответствующими присоединенными фреймами.

#### Сохранение полученных в результате фильтрации данных

Используя кнопку **Send Data** на панели управления фильтрами (Puc.1-93), присоединенный фрейм, соответствующий пункту, выделенному в списке примененных фильтров, можно скопировать в Дерево фреймов, в качестве фрейма первого уровня. Далее, этот фрейм, из Дерева фреймов можно сохранить стандартным способом стандартным способом (<u>1.3.4</u> на стр. <u>19</u>).



Рис.1-93. Кнопка Send Data на панели управления фильтрами

Исходный фрейм можно сохранить вместе со всеми присоединенными фреймами, полученными в результате применения фильтров. Чтобы сохранить фрейм, выберите команду меню: File → Save Frames with Results.

## 1.7.1.3. Выбор фильтра через диалоговое окно Filter Window

Кнопка **D** List of Filters на панели управления фильтрами (Рис.1-94) открывает диалоговое окно Filter Window (Рис.1-95).



Рис.1-94. Кнопка List of Filters на панели управления фильтрами

	Filter	Window		×
De	escrip	tion		
	_			_
		ourier		
		mootning Sharpening		
		)ther		
		dge enhancement		
	i ⊕ - S	imoothing		
	⊕ · N	Ion-linear		
		:dge ennancement )escale		
	<u>.</u>	idge enhancement		
		imoothing		
		🔲 Maci	ro Mode	
		Apply	Undo	
		C	ose	

Рис.1-95. Диалоговое окно Filter Window

Диалоговое окно Filter Window позволяет последовательно применять любой из имеющихся в списке фильтров.

Чтобы применить нужный фильтр, выделите его название и щелкните на кнопке **Apply**.

Действие последнего фильтра из списка примененных фильтров можно отменять при помощи кнопки **Undo**.

#### 1.7.2. Описание фильтров

## 1.7.2.1. Линейные фильтры

Линейные фильтры основаны на использовании преобразования исходной функции, при котором производится свертка функции с ядром фильтра.

Математически, свертка исходной двумерной функции Z(i,j) с ядром фильтра K(k,l), имеющим размер  $N \times M$  элементов (где N и M –нечетные), описывается как:

$$Z'(i,j) = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^{N} \sum_{l=1}^{M} K(k,l) Z(i - (N+1)/2 + k, j - (M+1)/2 + l)$$

где S – сумма элементов ядра, определяемая как

$$S = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} K(i,j)$$

Z'(i,j) – результирующее изображение, полученное после применения фильтра.

К линейным фильтрам относятся следующие группы фильтров:

- Сглаживающие (Smoothing, Low Pass) сглаживают изображение
- Градиентные или дифференцирующие (**Edge enhancement**) контрастируют границы и края
- Контрастирующие (Sharpening, High Pass) повышают визуальную резкость и контрастность изображения

#### 1.7.2.2. Сглаживающие фильтры (Smoothing, Low Pass)

Сглаживающие фильтры обычно используются, чтобы уменьшить высокочастотные шумы. К сглаживающим фильтрам относятся:

- Однородные фильтры;
- Гауссовы фильтры.

#### Однородные сглаживающие фильтры:

Uniform 3x3 Uniform 5x5

Однородный фильтр – наиболее простой сглаживающий фильтр. Результирующее изображение (результирующая функция) получается в результате простого усреднения по некоторой локальной области исходного изображения (исходной функции).

Uniform 3x3, Uniform 5x5 – однородные сглаживающие фильтры, у которых матрицы ядра *К* имеют размер, соответственно, 3х3 и 5х5 (Рис. 1-96, Рис. 1-97).

	1 1 1 1 1
$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	
1 1 1	1 1 1 1 1
$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	
Рис. 1-96. Uniform 3x3	Рис. 1-97. Uniform 5x5

При применении фильтра Uniform 3x3 для каждой точки функции производится усреднение по локальной области, содержащей 3х3 точки.

При применении фильтра Uniform 5x5 усреднение производится по области, содержащей 5х5 точек.

Гауссовы фильтры: Gaussian 3x3 0.85, Gaussian 3x3 0.391, Gaussian 5x5 0.625, Gaussian 5x5 1.0

Гауссовы фильтры являются сглаживающими фильтрами, у которых значения в ядре, в отличие от однородного фильтра, выбираются согласно форме функции Гаусса:

 $K(i, j) = \exp(-(i^2 + j^2)/2\sigma)$ .

Gaussian 3x3 0.85, Gaussian 3x3 0.391 – гауссовы сглаживающие фильтры, у которых матрицы ядра K(i, j), имеют размер 3х3, а параметр  $\sigma$  имеет, соответственно, величину 0.85 и 0.391 (Рис. 1-98, Рис. 1-99)

[1	2	1	1	4	1
2	4	2	4	12	4
1	2	1	1	4	1

Рис. 1-98. Gaussian 3x3 ( $\sigma$  = 0.85) Рис. 1-99. Gaussian 3x3 ( $\sigma$  = 0.391)

Gaussian 5x5 0.625, Gaussian 5x5 1.0 – гауссовы сглаживающие фильтры, у которых матрицы ядра K(i, j), имеют размер 5х5, а параметр  $\sigma$  имеет, соответственно, величину 0.625 и 1.0 (Рис. 1-100, Рис. 1-101)

[1	2	3	2	1
2	7	11	7	2
3	11	17	11	3
2	7	11	7	2
1	2	3	2	1

2	7	12	7	2
7	31	52	31	7
12	52	127	52	12
7	31	52	31	7
2	7	12	7	2

```
Рис. 1-100. Gaussian 5x5 (σ = 0.625)
```

Рис. 1-101. Gaussian 5x5 (σ = 1.0)

## 1.7.2.3. Градиентные (дифференцирующие) фильтры

Градиентные или дифференцирующие (**Edge enhancement**) фильтры используются для выделения границ объектов, для подчеркивания и усиления локальных неоднородностей, посредством выделения их границ.

К градиентным фильтрам относятся:

Prewitt vertical; Prewitt horizontal; Sobel vertical;

Sobel horizontal.

Фильтр **Prewitt vertical** производит дифференцирование в горизонтальном направлении (по оси X) и усреднение в вертикальном (по оси Y). Фильтр **Prewitt horizontal** производит дифференцирование в вертикальном направлении (по оси Y) и усреднение в горизонтальном (по оси X). Матрицы указанных фильтров приведены, соответственно, на Рис. 1-102, Рис. 1-103

[1 (	) -1]	[ ]	l	1	1
1 0	) -1	(	)	0	0
1 0	) -1	[-	1 -	-1	-1

Рис. 1-102. Prewitt vertical Рис. 1-103. Prewitt horizontal

Фильтр **Prewitt vertical** выделяет границы объектов, расположенные в вертикальном направлении. Фильтр **Prewitt horizontal** выделяет границы объектов, расположенные в горизонтальном направлении. На Рис.1-104 приведен пример применения фильтра **Prewitt vertical**, на Рис.1-105 – пример применения фильтра **Prewitt horizontal**.



Рис.1-104. Слева исходное изображение вертикально расположенной решетки, справа - после применения фильтра **Prewitt vertical** 



Рис.1-105. Слева исходное изображение нанотрубки, расположенной в горизонтальном направлении, справа - изображение после применения фильтра **Prewitt horizontal** 

Фильтры Sobel vertical, Sobel horizontal являются модификацией фильтров Prewitt vertical, Prewitt horizontal. Они действуют, подобным образом, но в меньшей степени сглаживают изображение. Матрицы указанных фильтров приведены на Рис. 1-106, Рис. 1-107.

1	0	-1	1	2	1
2	0	-2	0	0	0
_1	0	-1_	1	-2	-1

Рис. 1-106. Sobel vertical

Рис. 1-107. Sobel horizontal

## 1.7.2.4. Контрастирующие фильтры (Sharpening, High Pass)

Контрастирующие фильтры (Sharpening (High Pass) filters), в отличие от сглаживающих фильтров, усиливают разницу между соседними точками изображения. Эти фильтры используются для повышения общей визуальной четкости изображения, для выделения границ областей и объектов, имеющих различную высоту, для контрастирования локальных неоднородностей.

К контрастирующим фильтрам относятся:

Laplacian 3x3, Laplacian 5x5 High Pass 3x3, High Pass 5x5 Sharpen 3x3 High Pass var 2 5x5

Фильтры Laplacian 3x3, High Pass 3x3, Sharpen 3x3 имеют матрицы ядра размером 3x3, приведенные, соответственно, на Рис. 1-108, Рис. 1-109. High Pass 3x3 – тождественное название фильтра Laplacian 3x3.

[-1	-1	-1]	[-	-1	-1	-1]
-1	8	-1	-	-1	16	-1
$\lfloor -1 \rfloor$	-1	-1	L-	-1	-1	-1

Рис. 1-108. Laplacian 3x3	Рис. 1-109. Sharpen 3x3
---------------------------	-------------------------

Фильтры Laplacian 5x5, High Pass 5x5, High Pass var 2 5x5 имеют матрицы ядра размером 5x5, приведенные, соответственно, на Рис. 1-110, Рис. 1-111, Рис. 1-112.

$\left[-1\right]$	-3	-4	-3	-1]	Γ-	1	-1	-1	-1	-1		$\left[-2\right]$	-2	-2	-2	-2]
-3	0	6	0	-3	-	1	-1	-1	-1	-1		-2	-3	-3	-3	-2
-4	6	20	6	-4	-	1	-1	24	-1	-1	-	-2	-3	57	-3	-2
-3	0	6	0	-3	-	1	-1	-1	-1	-1		-2	-3	-3	-3	-2
$\lfloor -1$	-3	-4	-3	-1	L-	1	-1	-1	-1	-1_		_ 2	-2	-2	-2	-2

Рис. 1-110. Laplacian 5x5

Рис. 1-111. High Pass 5x5

Рис. 1-112. High Pass var 2 5x5

Пример применения фильтра **High Pass 5x5** для контрастирования C3M изображения приведен на Puc.1-113.



Рис.1-113. Слева - исходное СЗМ изображение бактерии E-coli, справа – после применения фильтра **High Pass 5x5** 

## 1.7.2.5. Нелинейные фильтры

<u>К нелинейным относятся медианные фильтры:</u> Median 3x3; Median 5x5; Median 7x7;

Медианные фильтры являются сглаживающими фильтрами, которые хорошо убирают шумы импульсного характера, например, шумы в виде «отдельных точек», и в то же время, сохраняют резкость границ.

Эти фильтры работают следующим образом. Окно фильтра, состоящее из n×n точек (соответственно 3x3 в Median 3x3, 5x5 в Median 5x5 и 7x7 в Median 7x7) перемещается по изображению от точки к точке. Для каждой точки исходной функции рассматривается локальная область, определяемая размерами окна фильтра. Значения функции в точках этой локальной область (т.е. в точках окна фильтра) выстраиваются по возрастанию, и значение, стоящее в центре этого ряда, присваивается значению выходной функции в данной точке. Если окно фильтра имеет размеры 3x3 (Median 3x3), то число значений в полученном ряду будет 9, и выбирается центральная точка из этих девяти значений, соответственно, в случае фильтра размером 5x5 (Median 5x5), ряд имеет 25 членов, и выбирается центральная точка из этих 25 значений, и т.д.

Таким образом, случайные «точечные» выбросы и провалы при такой сортировке окажутся на краях сортируемого массива, будут отфильтрованы и не войдут в результирующее изображение.

Пример применения фильтра **Median 5x5** для фильтрации импульсных помех приведен на Puc.1-114.



Рис.1-114. Слева исходное СЗМ изображение, справа – после применения фильтра Median 5x5

## 2. Анализ и обработка данных

## 2.1. Обработка и анализ 2D-данных

## 2.1.1. Активация методов обработки и анализа

Для активации необходимого метода можно использовать либо Дерево методов, либо меню **Analysis** в главном меню.

#### Активация через дерево методов

Все методы обработки и анализа разделены на группы, которые объединяют родственные методы. Список групп и входящих в них методов содержится в дереве методов (Рис. 2-1, Рис. 2-2). Дерево методов является двухуровневым: первый уровень – список групп (Рис. 2-1), второй уровень – список методов входящих в группу (Рис. 2-2).



Рис. 2-1. Свернутое дерево методов. Первый уровень – группы методов

⊕ Average.

庄 - Editing

庄 - Grain

⊕ Equilization

⊕ Roughness

Sections

Data Transformations

E Flatten Correction 2D

Рис. 2-2. Развернутое дерево методов. Группы и входящие в них методы

Дерево методов может быть свернутым, если все группы свернуты (Рис. 2-1), развернутым, если все группы развернуты (Рис. 2-2), частично развернутым, если только некоторые группы развернуты.

Активация через Дерево методов производится посредством двойного щелчка на выбранном методе.

#### Активация через меню Analysis

Доступ к необходимому методу через меню **Analysis** двухступенчатый. Меню **Analysis** (Рис. 2-3) содержит список групп.



Рис. 2-3. Меню Analysis

Выбирая соответствующую группу, можно получить доступ к необходимому методу. На примере (Рис. 2-4) выбор группы Flatten Correction 2D открывает доступ к методам этой группы: Subtract Surface, Three Point Leveling.



Рис. 2-4. Выбор группы Flatten Correction 2D → доступ к методам Subtract Surface, Three Point Leveling

## 2.1.2. Общие элементы окон обработки и анализа 2D-данных

При активации определенного метода анализа или обработки 2D-данных открывается окно, соответствующее выбранному методу. Окна, соответствующие различным методам, имеют различный состав и расположение составляющих элементов. Можно выделить общие элементы, которые имеют одинаковую структуру для различных окон. Такими, общими элементами являются: панель 2D-данных, панель 1D-данных.

## 2.1.2.1. Панель 2D-данных

Панель 2D-данных (Рис. 2-5) используется во всех окнах методов обработки и анализа как элемент для отображения входных 2D-данных, а также в некоторых методах в качестве элемента для отображения выходных 2D-данных.



Рис. 2-5. Панель 2D -данных

Панель 2D-данных (Рис. 2-5) содержит:

- область отображения 2D-данных,
- панель инструментов,
- информационную строку.

Панель инструментов **2D-данных**, в зависимости от метода обработки или анализа, может содержать набор стандартных кнопок (Табл. 2-1), а также ряд специфических кнопок, соответствующих конкретному методу.

Информационная строка 2D-данных служит для отображения: параметров выделенной на изображении области, при использовании инструмента **Select Region;** или результатов измерений, получаемых при использовании таких инструментов, как **Point** (координаты точки), **Length** (длина), **Angle** (угол).

Обозначение	Название	Выполняемая функция
•	Zoom In	Увеличение изображения
Q	Zoom Out	Уменьшение изображения
1	Move Visible Area	Перемещение видимой области
\$	Viewer Settings	Открывает диалоговое окно Setting Dialog для настройки интерфейса панели отображения 2D-данных
*	Z Coloration	Ручная настройка контраста изображения
	Select Region	Выделение прямоугольной области на изображении
Ø	Point	Отображение координат точки, выбранной курсором на изображении
	Length	Измерение расстояния между двумя точками
	Angle	Измерение угла между двумя выбранными направлениями
Ð	Send Data	Пересылка 2D-данных в Дерево фреймов

Табл. 2-1. Стандартные кнопки панели инструментов 2D-данных

## 2.1.2.2. Панель 1D-данных

В окнах методов обработки и анализа панель 1D-данных используется для отображения выходных 1D-данных: графиков сечений, гистограмм и других одномерных функций.



Рис. 2-6. Панель 1D-данных

Панель 1D-данных (Рис. 2-6) содержит:

- область отображения графика функции,
- панель инструментов,
- информационную строку.

Панель инструментов 1D-данных, в зависимости от метода обработки или анализа, может содержать набор стандартных кнопок (Табл. 2-2), а также ряд специфических кнопок, соответствующих конкретному методу.

Информационная строка 1D-данных служит для просмотра значений функции и отображает параметры выделенного маркера.

Обозначение	Название	Выполняемая функция		
	Markers	Включает одиночный маркер.		
2	Pair Markers	Включает парный маркер.		
	Send Data	Пересылает 1D-данные в Дерево фреймов.		
\$	Viewer Settings	Открывает диалоговое окно Setting Dialog для настройки интерфейса панели отображения 1D-данных		

Табл. 2-	2. Стандартны	е кнопки панелі	и инструментов	в 1D-ланных
1001. 2	z. orangapriit		n minorpymonio	ль данных

## 2.1.3. Section Analysis – анализ профиля поверхности

Метод Section Analysis предназначен для анализа профиля поверхности.

Section Analysis позволяет:

- получать профиль поверхности для сечений различного типа;
- рассчитывать основные статистические параметры для полученной кривой сечения поверхности.

## 2.1.3.1. Активация Section Analysis

Section Analysis активируется стандартным способом: либо через Дерево методов, посредством двойного щелчка на Section Analysis (Рис. 2-7); либо через главное меню, последовательным выбором пунктов Analysis → Section →Section Analysis.



Рис. 2-7 Активация Section Analysis через дерево методов. В результате открывается окно **Section Analysis**.

## 2.1.3.2. Окно Section Analysis



Рис. 2-8. Окно Section Analysis

Окно Section Analysis (Рис. 2-8) содержит следующие элементы:

- панель 2D-данных,
- панель 1D-данных,
- панель управления,
- область статистических параметров кривой сечения.

#### Панель 2D-данных Section Analysis



Рис. 2-9. Section Analysis. Панель исходных 2D-данных

На данной панели (Рис. 2-9) отображается исходное 2D-изображение.

Панель инструментов **Section Analysis** содержит, кроме стандартных кнопок, набор кнопок инструментов сечения, работа последних детально описана в п. <u>2.1.3.3</u> «Инструменты сечений» на стр. <u>72</u>.

Если на панели инструментов активирован какой-либо инструмент сечения, на изображении отображается соответствующая ему линия сечения. В информационной строке отображаются параметры линии сечения.

#### Панель 1D-данных



Рис. 2-10. Section Analysis.Панель 1D-данных

На данной панели (Рис. 2-10) отображается кривая профиля сечения. Панель инструментов имеет ряд стандартных кнопок. В информационной строке отображаются параметры маркеров, если последние активированы.

#### Область статистических параметров кривой сечения

В данной области (Рис. 2-11) в виде таблицы отображаются параметры линии сечения и результаты расчета основных статистических параметров для кривой сечения.

Height [CD-01.mdt] Section Position X: 7,0958 µm Y: 7,5974 µr	n Length = 20,596 μm Angle = 45,032 deg.	-
Amount of sampling	335	
Length	20,596 µm	
MinZ	-26,1 nm	
MaxZ	44,752 nm	
Peak to Peak	70,852 nm	
Average	-1,0478 nm	
Root Mean Square, Sq	20,417 nm	
Average Roughness, Sa	17,915 nm	
		•

Рис. 2-11. Section Analysis. Область статистических параметров кривой сечения

Панель управления Section Analysis

Angle	15,00
	🔅 Adjusting

Рис. 2-12. Section Analysis. Панель управления

Панель управления Section Analysis (Рис. 2-12) содержит следующие элементы управления:

Кнопка Adjusting открывает диалоговое окно Table Params Setting (Рис. 2-13).
 Это окно служит для выбора параметров, которые будут отображаться в Области статистических параметров.

Table Params Setting	5	×
Amount of sampling		
Length		
MinZ		
MaxZ		
Peak-to-peak, Sy		
Mean Value		
Root Mean Square, Sq		
Roughness Average, Sa		
	ОК	Cancel

Рис. 2-13. Section Analysis. Окно выбора статистических параметров

Поле Angle относится только к инструменту Average Section (2.1.3.3 на стр. <u>72</u>). Этот параметр задает значение угла ориентации прямоугольной области относительно оси X.

## 2.1.3.3. Инструменты сечений

Выбор типа сечения производится посредством выбора соответствующего инструмента сечения на панели инструментов Section Analysis (Рис. 2-14)



Рис. 2-14. Section Analysis. Панель инструментов

Табл. 2-3. Инструменты сечений

C Section	Сечение фиксированной длины и ориентации;
Point Section	Произвольное сечение
🗢 X Section	Сечение по оси Х;
Y Section	Сечение по оси У;
Center Section	Сечение из центра 2D-изображения;
Radius Section	Среднее сечение круговой области радиуса R;
Average Section	Среднее сечение по прямоугольной области, ориентированной под выбранным углом к оси Х.
Cross Section	Два взаимно перпендикулярных сечения, соответственно, по оси X и по оси Y, проходящих через выбранную точку.

#### Инструмент 🌌 Section – сечение фиксированной длины и ориентации

По умолчанию, при открытии окна **Section Analysis**, данный инструмент находится в активированном состоянии (Рис. 2-15).



Рис. 2-15. Сечение фиксированной длины и ориентации.
На исходном 2D-изображении отображается линия сечения фиксированной длины и ориентации с отмеченными концами. Внизу, в информационной строке, отображаются параметры линии сечения: координаты левого конца линии (X: 0,31523 µm Y: 0,32826 µm), длина линии сечения и угол относительно оси X (Length=0,71458 µm и Angle=45,007 deg.). В области 1D-данных отображается график кривой, соответствующей линии сечения.

Линию сечения можно перемещать относительно изображения (параллельный перенос), захватив ее курсором в средней части.

Линию сечения можно изменять, захватив курсором за любой из концов, и растягивая ее длину или вращая относительно другого конца.

При перемещении и изменении линии сечения будет меняться отображаемый график кривой, поскольку он соответствует текущей линии сечения.

#### Инструмент 🧹 Point Section – произвольное сечение

Для использования данного инструмента (Рис. 2-16) следует выполнить следующие действия:

- 1. Активировать данный инструмент на панели инструментов Section Analysis, нажатием кнопки .
- 2. Перемещая курсор по изображению, выбрать начальную точку линии сечения и зафиксировать ее нажатием левой кнопки мыши.
- 3. Удерживая левую кнопку в нажатом состоянии, переместить курсор в нужную точку и отпустить кнопку. Произойдет фиксация второго конца линии.
- 4. Далее линию сечения можно изменять, захватив курсором за любой из концов, и растягивая ее длину или вращая относительно другого конца.



Рис. 2-16. Произвольное сечение

В информационной строке (Рис. 2-16) отображаются параметры линии сечения:

- координаты первой точки линии сечения (X: 0,51926 µm Y: 0,57661 µm);

- длина линии сечения (Length=0,71458 μm);
- угол относительно оси X (Angle=45,007 deg).

В области 1D-данных отображается график кривой, соответствующий текущей линии сечения. А в области статистических параметров отображаются статистические параметры кривой сечения.

## Инструмент 🖙 Х Section – сечение по оси Х

Для использования данного инструмента (Рис. 2-17) следует выполнить следующие действия:

- 1. Активировать инструмент на панели инструментов Section Analysis.
- 2. Поместить курсор в нужное место на 2D-изображении.
- Нажать на левую кнопку мыши. В результате появится горизонтальная линия сечения, проходящая через конец курсора. Пока кнопка мыши нажата, линию можно перемещать вместе с курсором.
- 4. Удерживая левую кнопку мыши в нажатом состоянии, переместить линию сечения, в вертикальном направлении в нужное положение.



5. Отпустив левую кнопку мыши, зафиксировать линию сечения.

Рис. 2-17. Сечение по оси Х

Если поместить курсор в определенную точку на 2D-изображении и щелкнуть левой кнопкой мыши, то линия сечения скачком переместится и пройдет через выбранную точку, и при этом положение ее зафиксируется.

Для каждой текущей линии сечения отображаются:

- уравнение линии сечения, параллельной оси X (Y: 8,4602 μm), в информационной строке;
- график кривой, соответствующий линии сечения, в области 1D-данных;
- статистические параметры кривой сечения, в области статистических параметров.

# Инструмент **У** Section – сечение по оси **У**

Данный инструмент работает аналогично инструменту **X Section**, за исключением того, что он действует по оси Y.

Инструмент 🚾 Center Section – сечение из центра 2D-изображения

Для использования данного инструмента (Рис. 2-18) следует выполнить следующие действия:

- 1. Активировать инструмент на панели инструментов Section Analysis.
- 2. Поместить курсор на 2D-изображение и щелкнуть левой кнопкой мыши. В результате появится радиус вектор, соединяющий центр изображения и точку, в которой находится курсор.
- 3. Далее линию сечения можно изменять, захватив курсором за конец радиуса вектора, растягивая или уменьшая длину радиуса вектора, или вращая радиус вектор вокруг центральной точки.



Рис. 2-18. Сечение из центра 2D-изображения

В информационной строке отображаются параметры линии сечения:

- координаты центральной точки изображения, которая является первым концом линии сечения, (X: 0,68615 μm Y: 0,68773 μm);
- длина линии сечения (Length=0,50869 µm);
- угол относительно оси X (Angle=38,925 deg.).

В области 1D-данных отображается график кривой, соответствующий текущей линии сечения. А в области статистических параметров отображаются статистические параметры кривой сечения.

## Инструмент 🖾 Radius Section – среднее сечение круговой области радиуса R

Этот инструмент позволяет для круговой области R, лежащей около центральной точки, выбранной пользователем на 2D-изображении, найти средний профиль радиального сечения этой области.

Алгоритм определения среднего радиуса следующий. Пользователь выбирает точку – центр окружности и задает радиус окружности. Для этой окружности проводятся радиальные сечения, и рассчитывается среднее радиальное сечение. Число сечений, по которым рассчитывается среднее, определяется из отношения длины окружности к величине минимального шага по осям X, Y (к величине минимального шага изменения аргумента исходной 2D-функции).

Для использования данного инструмента (Рис. 2-19) следует выполнить следующие действия:

- 1. Активировать данный инструмент на панели инструментов Section Analysis.
- 2. На 2D-изображении выбрать начальную точку (центр будущей окружности) и зафиксировать ее нажатием левой кнопки мыши.
- 3. Удерживая левую кнопку в нажатом состоянии, переместить курсор в нужную точку и отпустить кнопку. Полученный радиус вектор определяет окружность, для которой рассчитывается среднее радиальное сечение.
- 4. Радиус окружности можно изменять, растягивая или уменьшая его длину радиуса вектора, захватив курсором за конец радиуса вектора.



Рис. 2-19. Среднее радиальное сечение

В информационной строке отображаются параметры линии сечения:

- координаты выбранной центральной точки (X: 0,68615 µm Y: 0,68773 µm);
- длина радиус-вектора (Length=0,42309 µm);
- угол относительно оси X (Angle=21,775 deg.).

В области 1D-данных отображается график кривой, соответствующий среднему радиальному сечению для круговой области с выбранным радиусом и центральной точкой. А в области статистических параметров отображаются статистические параметры кривой среднего радиального сечения.

## 2.1.3.4. Сохранение полученных результатов

#### Сохранение 1D данных

Для сохранения, полученные 1D данные (график кривой сечения) следует отправить в Дерево фреймов качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (1.3.4 «Сохранение фреймов» на стр. 19).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку **Send Data** на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку **OK** создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки **Send Data**.
- Нажатие на кнопку OK+<Ctrl>+<Alt> создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

#### Сохранение полученных статистических параметров

Полученные статистические параметры можно сохранить как фрагмент текста, т.е. сначала выделить текст с параметрами стандартным образом, затем скопировать выделенный фрагмент в буфер, вставить из буфера в какой-либо открытый текстовый документ в каком-либо текстовом редакторе и затем этот документ сохранить.

#### Сохранение графических данных

Графический объект – исходное изображение с линией сечения можно сохранить используя клавишу <Print Screen>, либо специальные программы.

## 2.1.4. Roughness Analysis – анализ шероховатости поверхности

Метод Roughness Analysis предназначен для анализа шероховатости поверхности.

#### Метод:

- вычисляет основные статистические параметры исходной 2D-функции,
- строит гистограмму плотности распределения значений функции (Histogram),
- строит график кривой распределения значений функции (Bearing Ratio).

**Roughness Analysis** работает в двух режимах: без выделения, и с выделением областей на исходном 2D-изображении.

Если на исходном 2D-изображении нет выделенных областей, то **Roughness Analysis** выполняется для всего изображения.

Если на изображении выделена одна или несколько областей, то **Roughness Analysis** выполняется, в зависимости от выбора пользователя:

- для суммарной выделенной области,
- для каждой отдельной выделенной области,
- для невыделенной области.

# 2.1.4.1. Активация Roughness Analysis

Roughness Analysis активируется стандартным способом: либо через дерево методов, посредством двойного щелчка на Roughness Analysis (Рис. 2-20) либо через главное меню, последовательным выбором пунктов Analysis → Roughness Analysis.



Рис. 2-20. Активация Roughness Analysis через дерево методов

В результате открывается окно Roughness Analysis.



# 2.1.4.2. Окно Roughness Analysis

Рис. 2-21.Окно Roughness Analysis

Окно Roughness Analysis (Рис. 2-21) содержит следующие элементы:

- панель исходных 2D-данных,
- панель Histogram,
- панель Statistic Parameters,
- панель Bearing Ratio,
- панель управления.

## 2.1.4.3. Панель исходных 2D-данных

На данной панели (Рис. 2-22) отображается исходное 2D-изображение.



Рис. 2-22. Roughness Analysis. Панель исходных 2D данных

Панель инструментов содержит ряд стандартных кнопок, которые описаны в п. <u>2.1.2.1</u> «Панель 2D-данных» на стр. <u>65</u>.

Если на изображении выделена область, то в информационной строке (под изображением) отображаются параметры этой области. Если активирован какой-либо инструмент измерения (**Point, Length, Angle**), то в информационной строке отображаются результаты измерения.

### 2.1.4.4. Панель Histogram

На данной панели (Рис. 2-23) отображается гистограмма плотности распределения значений исходной 2D-функции.



Рис. 2-23. Панель Histogram

Панель инструментов гистограммы содержит ряд стандартных кнопок, которые описаны в п. <u>2.1.2.2</u> «Панель 1D-данных» на стр. <u>66</u>. В информационной строке (под гистограммой) отображаются параметры маркеров, если последние активированы.

#### Гистограмма плотности распределения исходной функции

Исходная 2D-функция (исходное 2D-изображение) является дискретной двумерной функцией  $Z(X_i, Y_i)$ . Она имеет некоторый минимальный шаг по Z.

На гистограмме ось X соответствует оси Z исходной 2D-функции. По оси X значения функции Z откладываются с определенным шагом, который равен или кратен, минимальному шагу по Z. Шаг по X задается параметром **Step** на панели управления (см. п. <u>2.1.4.7</u> на стр. <u>84</u>). Шаг по X равен произведению значения параметра **Step** на значение минимального шага по Z:

Шаг по X = Step × (минимальный шаг по Z)

При значении параметра **Step**=1 шаг по X равен минимальному шагу по Z исходной функции.

По оси Y на гистограмме, для каждого значения X откладывается число точек исходной 2D функции, значения которых лежат в интервале от Z до Z+Step×(минимальный шаг по Z).

#### 2.1.4.5. Панель Bearing Ratio

На данной панели (Рис. 2-24) отображается график функции распределения значений исходной 2D-функции.



Рис. 2-24. Панель Bearing Ratio

Панель инструментов **Bearing Ratio** содержит ряд стандартных кнопок, которые описаны в п. <u>2.1.2.2</u> на стр. <u>66</u>. В информационной строке отображаются параметры маркеров, если последние активированы.

## 2.1.4.6. Панель Statistic Parameters

Панель Statistic Parameters (Рис. 2-25) расположена слева, в нижней части окна Roughness Analysis. В ней отображаются в виде таблицы результаты расчета основных статистических параметров для исходной 2D-функции.

	🔅 Adjusting
6,55E04	
26,7 nm	
0 nm	
26,7 nm	
13,3 nm	
12,7 nm	
9,32 nm	
	6,55E04 26,7 nm 0 nm 26,7 nm 13,3 nm 12,7 nm 9,32 nm

Рис. 2-25. Панель Statistic Parameters

Кнопка Adjusting, расположенная на данной панели вверху справа, активировать позволяет диалоговое окно выбора выводимых статистических параметров (Рис. 2-26).



Рис. 2-26. Окно выбора выводимых статистических параметров

Табл. 2-4. Статистические параметры,	, вычисляемые в Roughness Analysis.
Zij=Z(Xi,Yj) – исходная дискретная	функция, заданная на плоскости ХҮ,
	Nx, Ny - число точек по осям X, Y

Amount of sampling	Число точек функции $Z_{ij}=Z(X_i, Y_j)$ , равное $N_x*N_y$
Мах	Максимальное значение <b>Z</b> <sub>ij</sub> (максимальная высота)
Min	Минимальное значение $Z_{ij}$ (минимальная высота)
Peak-to-peak, S <sub>y</sub>	Размах высот (peak to peak value, ISO 4287/1), нм
Ten point height, S <sub>z</sub>	<b>S<sub>z</sub>=1/5(Z<sub>max1</sub>+ Z<sub>max2</sub>+ Z<sub>max3</sub>+ Z<sub>max4</sub>+ Z<sub>max5</sub> - Z<sub>min1</sub>- Z<sub>min2</sub>- Z<sub>min3</sub>- Z<sub>min4</sub>- Z<sub>min5</sub>), десять точек по высоте, (ten point height, ISO 4287/1), параметр выражает шероховатость поверхности по выбранным пяти максимальным высотам и впадинам, нм</b>
Mean Value, µ	Среднее значение, первый момент, нм
	$\mu = \frac{1}{Nx * Ny} \sum_{j=1}^{Ny} \sum_{i=1}^{Nx} Z_{ij}$
Roughness Average, Sa	Средняя арифметическая шероховатость (average roughness, ISO 4287/1), нм
	$S_{a} = \frac{1}{N_{x} * N_{y}} \sum_{j=1}^{N_{y}} \sum_{i=1}^{N_{x}}  Z_{ij} - \mu $
Second moment, µ2	Начальный момент второго порядка, нм <sup>2</sup>
	$\mu_{2} = \frac{1}{N_{x} * N_{y}} \sum_{j=1}^{N_{y}} \sum_{i=1}^{N_{x}} Z_{ij}^{2}$
Root Mean Square, Sq	Средняя квадратичная шероховатость (root mean
	square roughness, ISO 4287/1), HM $S_{q} = \sqrt{\frac{1}{N_{x} * N_{y}} \sum_{j=1}^{N_{y}} \sum_{i=1}^{N_{x}} (Z_{ij} - \mu)^{2}}$
Surface Skewness, Ssk	$S_{sk} = \frac{1}{N_x * N_y * S_q^3} \sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} (Z_{ij} - \mu)^3$
	Коэффициент асимметрии, характеризует несимметричность распределения. Если асимметрия отличается от нуля, то распределение несимметрично. Для симметричного (относительно центра) распределения асимметрия равна нулю. Асимметрия положительна, если распределение имеет длинный правый «хвост», и отрицательна, если распределение имеет длинный левый «хвост»

Coefficient of Kurtosis, Ska	$S_{ka} = \frac{1}{N_x * N_y * S_q^4} \sum_{j=1}^{Ny} \sum_{i=1}^{Nx} (Z_{ij} - \mu)^4 - 3$ Коэффициент эксцесса, характеризует протяженность распределения
Entropy, H(Z)	Энтропия распределения вероятностей $p(Z)$ для одномерной случайной величины Z с дискретным распределением, $H(Z) = -\sum_{z} p(Z) \log_2 p(Z)$
Redundance	$1 - \frac{\sum_{z} p(Z) \log_2 p(Z)}{\log_2 (MaxZ - MinZ + 1)}$

## 2.1.4.7. Панель управления

Step	5	Areas Include	•	Calc.By All	•



Панель управления **Roughness Analysis** (Рис. 2-27) содержит следующие элементы управления:

- поле ввода параметра **Step**, который задает значение шага по оси *X* при построении гистограммы (п. <u>2.1.4.4</u> на стр. <u>80</u>);
- список выбора области на 2D-изображении для Roughness Analysis;
- список выбора режима расчета.

Два последних элемента обеспечивают настройку **Roughness Analysis** в режиме работы с выделенными областями на 2D-изображении.

Список выбора области на 2D-изображении для **Roughness Analysis** содержит два пункта (Рис. 2-28):

- Areas Include в этом случае Roughness Analysis выполняется для суммарной выделенной области или для каждой отдельной выделенной области, в зависимости от выбора режима расчета.
- Areas Exclude в этом случае Roughness Analysis выполняется для невыделенной области.



Рис. 2-28. Список выбора области

Список выбора режима расчета содержит два пункта (Рис. 2-29):

**Calc. By All** – в этом случае **Roughness Analysis** выполняется для всей суммарной выделенной области.

**Calc. By Each** – в этом случае **Roughness Analysis** выполняется для каждой отдельной выделенной области.

	Calc.By All
Calc.By All 📃	Calc.By All
	Calc.By Each

Рис. 2-29. Список выбора режима расчета

## 2.1.4.8. Roughness Analysis для выделенных областей

При открытии окна по умолчанию, **Roughness Analysis** работает в режиме «без выделения» и расчеты производятся для всей области исходного 2D-изображения.

Переход в режим с выделением происходит автоматически при выделении какойлибо области на 2D-изображении.

#### Одна выделенная область

Чтобы выделить первую область, следует поместить курсор в нужную точку на 2D– изображении, нажать левую кнопку мыши и, не отпуская кнопку, переместить курсор. Фиксация выделенной области происходит при отпускании кнопки мыши.



Рис. 2-30. Исходное изображение с выделенной областью. Гистограмма плотности распределения для выделенной области

Под 2D-изображением отображаются параметры выделенной области (Рис. 2-30):

- координаты левой нижней угловой точки (X=1.26 µm Y=1.08 µm);
- размер области по оси X (DX=0.553 µm);
- размер области по оси Y (DY=0.545 µm).

Выделенную область можно перемещать, зацепив ее в средней части курсором и удерживая нажатой левую кнопку мыши.

Размеры выделенной области можно изменять, зацепив курсором за середину любого края или уголок, и растягивая или сжимая область, при нажатой левой кнопке мыши.

#### Несколько выделенных областей

Выделение второй и последующих областей производится аналогично первой, но при нажатой клавише <Ctrl>.



Рис. 2-31. Исходное изображение с двумя выделенными областями. Гистограмма плотности распределения для верхней выделенной области

На Рис. 2-31 показаны две последовательно выделенных области. Первой была выделена нижняя, затем верхняя. В области отображения параметров выделения всегда отображаются координаты и размеры последней выделенной области.

Если имеется несколько выделенных областей то, **Roughness Analysis** выполняется либо для суммарной выделенной области, либо для каждой отдельной выделенной области, либо для невыделенной области, в зависимости от комбинаций установленных значений параметров **Areas Include, Calc.By Each** на панели управления. Ниже приведены эти комбинации.

#### Areas Include, Calc.By Each

В этом случае Roughness Analysis выполняется для каждой отдельной области. Отображаемая гистограмма плотности распределения и функция плотности соответствуют последней выделенной области, именно этот случай показан на Рис. 2-31, Рис. 2-32. Статистические параметры рассчитываются для каждой вновь выделенной области и последовательно добавляются в таблицу на панели Statistic Parameters (Рис. 2-32).



Рис. 2-32. Вывод статистических параметров для нескольких областей

#### Areas Include, Calc.By All

В этом случае Roughness Analysis выполняется для суммарной выделенной области.

Отображаемая гистограмма плотности распределения (Рис. 2-33) и функция плотности (Рис. 2-34) соответствуют текущей суммарной выделенной области.



Рис. 2-33. Исходное изображение с двумя выделенными областями. Гистограмма плотности распределения для суммарной выделенной области

Отображаемые статистические параметры соответствуют текущей суммарной выделенной области (объединению выделенных областей) (Рис. 2-34).



Рис. 2-34. Статистические параметры и график функции распределения (**Bearing Ratio**) суммарной выделенной области

#### Areas Include, Calc.By Each (Areas Include, Calc.By All)

В обоих этих случаях Roughness Analysis выполняется для всей невыделенной области.

#### Снятие выделения областей

Если необходимо снять выделение с какой-либо области, то следует поместить курсор мыши на эту область и щелкнуть правой кнопкой мыши. Выбор в открывшемся меню (Рис. 2-35) пункта **Delete** снимает выделение с выбранной области; выбор **Delete All** снимает выделение со всех областей.



Рис. 2-35. Снятие выделения областей

### 2.1.4.9. Сохранение полученных результатов

Для сохранения, полученные 1D данные (гистограмму и график функции распределения, Bearing Ratio) следует отправить в Дерево фреймов качестве фреймов первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (см. п. <u>1.3.4</u>. Сохранение фреймов на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку **Send Data** на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку **OK** создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки **Send Data**.
- Нажатие на кнопку OK+<Ctrl>+<Alt> создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

Полученные статистические параметры можно сохранить как фрагмент текста, т.е. сначала стандартным образом выделить текст с параметрами, затем скопировать выделенный фрагмент в буфер, вставить из буфера в какой-либо текстовый редактор и затем этот документ сохранить.

# 2.1.5. Local Equalization – повышение локальных контрастов изображения

Local Equalization является одним из методов повышения локальных контрастов изображения.

Данный метод можно использовать для анализа двумерной структуры поверхности. Local Equalization позволяет повысить детализацию двумерных поверхностных объектов. В частности, если рельеф имеет несколько характерных масштабов, то, применяя метод Local Equalization с соответствующими настройками, можно контрастировать поверхностные объекты, имеющие определенный характерный размер.

## 2.1.5.1. Активация Local Equalization

Local Equalization активируется стандартным способом: либо через дерево методов, посредством двойного щелчка на Local Equalization (Рис. 2-36), либо через главное меню, последовательным выбором пунктов Analysis  $\rightarrow$  Equalization  $\rightarrow$  Local Equalization.

Flatten Correction 1D	
🚊 Equilization	
Local Equilization	
🕂 Roughness	

Рис. 2-36. Активация Local Equalization через дерево методов

В результате открывается окно Local Equalization.

# 2.1.5.2. Окно Local Equalization



Рис. 2-37. Окно Local Equalization

Окно Local Equalization (Рис. 2-37) содержит следующие элементы:

- Панель исходных 2D-данных, в которой отображается исходное 2D-изображение;
- Панель выходных 2D-данных, в которой отображается результат применения метода Local Equalization;
- Панель управления.

# 2.1.5.3. Панель управления Local Equalization

Area Width, Pix	50,00	Apply
Area Height, Pix	50,00	Reset

Рис. 2-38. Панель управления Local Equalization

Панель управления Local Equalization (Рис. 2-38) содержит поля ввода параметров Area Width и Area Height. Эти параметры задают размеры локальной области (ширину и высоту, в пикселях), по которой производится преобразование исходной функции.

## 2.1.5.4. PaGoma Local Equalization

#### Принцип работы Local Equalization

При выполнении Local Equalization исходная функция *Zinp(Xi,Yj)* преобразуется в каждой (*i*, *j*)-точке следующим образом.

Для каждой точки (Xi, Yj) в плоскости XY берется локальная прямоугольная область, имеющая фиксированные размеры, (i,j)-точка является центром этой области. Размеры локальной области по осям X и Y задаются параметрами Area width и Area height (Рис. 2-38). Если локальная область имеет т точек по оси X, и n – точек по оси Y, то число точек функции, которые содержатся в локальной области равно произведению  $m \times n$ .

Далее, для каждой i,j - локальной области, строится распределение значений функции **Zinp** и определяется положение центральной точки (т.е. i,j точки) в этом распределении. Если на распределении левее центральной точки находится K точек (т.е. K точек имеют меньшую высоту чем центральная, i,j точка), то значению выходной функции **Zout**( $X_i, Y_j$ ) центральной i,j точки присваивается значение K. Например, если область имеет m точек по оси X, и n – точек по оси Y, то всего имеется m×n уровней высоты. Если центральная точка самая высокая, то ей будет соответствовать максимальный уровень высоты, равный m×n.

Данному преобразованию подвергаются все точки исходного изображения. Для того чтобы все изображения, полученные в результате применения Local Equalization, были стандартизированы, для *Zout* делается перенормировка, так, чтобы максимальное значение *Zout* равнялось максимальному возможному целочисленному значению, т.е. 32768 единицам.

#### Начальный момент работы

В начальный момент, при активации модуля Local Equalization параметры, задающие размеры локальной области (Area width и Area height) имеют загрузочные значения, оставшиеся от предыдущих установок, и для этих значений параметров и производится первоначальное вычисление Local Equalization.

#### Задание параметров метода

Посредством выбора определенного размера локальной области можно контрастировать двумерные объекты поверхностной структуры, имеющие определенный характерный размер.

Имеется два способа изменения размеров локальной области:

- посредством изменения значений параметров Area width и Area height. При изменении пользователем значений параметров Area width и Area height, в интерактивном режиме производится вычисление Local Equalization для новых значений параметров.
- непосредственным выделением на исходном изображении области, размеры которой и будут соответствовать размерам локальной области. Выделение производится стандартным образом.

Наличие выделенной области имеет приоритет. Как только появляется выделенная область, размеры именно этой области определяют размеры локальной области, а действие параметров Area width и Area height блокируется. Соответственно, величины, которые при этом имеют параметры Area width и Area height не имеют значения.

Для того чтобы вернуться к управлению через параметры Area width и Area height следует снять выделение (процедура снятия выделения описана в п. <u>2.1.4.8</u> на стр. <u>85</u>).

Ниже, на Рис. 2-39, Рис. 2-40 приведены два примера применения метода **Local Equalization** к одному и тому же исходному изображению, но при различных размерах локальной области.



Рис. 2-39. Local Equalization. Детализация двумерной поверхностной структуры. Размер локальной области 100 нм × 100 нм

На Рис. 2-39 слева – исходное изображение, показана выделенная область, имеющая размеры 100 нм × 100 нм. Справа – результат применения Local Equalization при размерах локальной области 100 нм × 100 нм.



Рис. 2-40. Local Equalization. Детализация двумерной поверхностной структуры. Размер локальной области 400 нм х400 нм

На Рис. 2-40 слева – исходное изображение, показана выделенная область, имеющая размеры 400 nm × 400nm. Справа - результат применения Local Equalization при размерах локальной области 400 нм × 400 нм.

#### 2.1.5.5. Сохранение полученных результатов

Для сохранения, полученный результат (преобразованное изображение) следует отправить в Дерево фреймов в качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (см. п. <u>1.3.4</u> Сохранение фреймов на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку **Send Data** на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку **OK** создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки **Send Data**.
- Нажатие на кнопку OK+<Ctrl>+<Alt> создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

## 2.1.6. Average FFT – вычисление среднего по строкам одномерного преобразования Фурье

Метод Average FFT для исходной 2D-функции (функции двух переменных, X,Y) вычисляет усредненное по строкам (в направлении X или Y) одномерное дискретное преобразование Фурье (*Average-Fx* или *Average-Fy*). В зависимости от выбора, вычисляются и отображаются на выходном графике Average FFT, следующие функции:

- спектр модуля (модуль функции Average-Fx, Average-Fy),
- спектр мощности (*PS-X*, *PS-Y*),
- корень квадратный из модуля,
- логарифм (натуральный, десятичный) из спектра мощности,
- функция спектральной плотности мощности (PSD-X, PSD-Y).

На кривой Average FFT вычисляется положение первого максимума, уточняется его положение, и приводится полученное уточненное значение для положения максимума, в пересчете на прямое пространство (в единицах длины).

Метод Average FFT работает следующим образом. Вычисляются одномерные дискретные преобразования Фурье для каждой строки, соответственно, для заданного направления, X или Y.

Для m-той строки в направлении оси X дискретное преобразование Фурье,  $Fx(m, v_k)$ , определяется соотношением (1), аналогично, для n-той строки в направлении оси Y дискретное преобразование Фурье,  $Fy(n, u_a)$ , определяется соотношением (2)

$$Fx(m, v_k) = \frac{1}{N_X} \sum_{n=0}^{N_X - 1} Z(X_n, Y_m) \exp(-i2\pi X_n v_k) = \frac{1}{N_X} \sum_{n=0}^{N_X - 1} Z(X_n, Y_m) \exp(-i2\pi (\frac{kn}{N_X}))$$
(1)

$$Fy(n,u_q) = \frac{1}{N_Y} \sum_{m=0}^{N_Y-1} Z(X_n, Y_m) \exp(-i2\pi Y_m u_q) = \frac{1}{N_Y} \sum_{m=0}^{N_Y-1} Z(X_n, Y_m) \exp(-i2\pi (\frac{qm}{N_Y}))$$
(2)

где:

 $Z(X_n, Y_m)$  – исходная дискретная функция двух переменных, X, Y, заданная

по X на интервале длиной  $L_X$ , в  $N_X$  точках (*n*=0, 1. 2, ...  $N_X$  -1), с одинаковым шагом  $\Delta X$ ;

по Y на интервале длиной  $L_Y$ , в  $N_Y$  точках ( $m=0, 1, 2, ..., N_Y$  -1), с одинаковым шагом  $\triangle Y$ ;

 $v_k = k \frac{1}{L_X}$ ,  $u_q = q \frac{1}{L_Y}$  – пространственные частоты по X, Y;  $\Delta v_k = \frac{1}{L_X}$ ,  $\Delta u_q = \frac{1}{L_Y}$  – приращения пространственных частот.

Если рассматривать функцию  $Z(X_n, Y_m)$  построчно, то число строк в направлении X равно числу точек по Y, и наоборот, число строк в направлении Y равно числу точек по X.

При расчете функций  $Fx(m, v_k)$ ,  $Fy(n, u_q)$  используется алгоритм быстрого преобразования Фурье (FFT).

На основе полученных функций  $Fx(m, v_k)$ ,  $Fy(n, u_q)$  рассчитываются функции среднего преобразования Фурье в результате усреднения по строкам.

Среднее преобразование Фурье по строкам в направлении X (*Average-Fx*) определяется соотношением (3):

$$Average-Fx = C_X(v_k) = \frac{1}{N_Y} \sum_{m=0}^{N_Y-1} Fx(m, v_k) = \frac{1}{N_Y} \sum_{m=0}^{N_Y-1} \frac{1}{N_X} \sum_{n=0}^{N_X-1} Z(X_n, Y_m) \exp(-i2\pi X_n v_k)$$
(3)

Среднее преобразование Фурье по строкам в направлении Y (*Average-Fy*) определяется соотношением (4):

$$Average-Fy = C_Y(u_q) = \frac{1}{N_X} \sum_{n=0}^{N_X - 1} Fy(n, u_q) = \frac{1}{N_X} \sum_{n=0}^{N_X - 1} \frac{1}{N_Y} \sum_{m=0}^{N_Y - 1} Z(X_n, Y_m) \exp(-i2\pi Y_m u_q)$$
(4)

Функция Average-Fx является комплексной:

$$Average-Fx = \operatorname{Re}(Average-Fx) + i\operatorname{Im}(Average-Fx) = C_X(v_k) = |C_X(v_k)| \exp(i\arg C_X(v_k))$$

где i – мнимая единица, Re(Average-Fx) - действительная часть, Im(Average-Fx) мнимая часть Average-Fx.

Аналогично, функция Average-Fy:

.

Average-Fy = Re(Average-Fy) + i Im(Average-Fy) =  $C_Y(u_q) = |C_Y(u_q)| \exp(i \arg C_Y(u_q))$ .

Средний спектр модуля (для направления Х) определяется как модуль функции среднего преобразования Фурье для направления Х:

$$\left|C_{X}(v_{k})\right| = \left|Average-Fx\right| \tag{5}$$

Аналогично определяется средний спектр модуля (для направления Y):

$$\left|C_{Y}(u_{q})\right| = \left|Average-Fy\right| \tag{6}$$

Функция среднего спектра мощности PS-X (для направления X) определяется как квадрат модуля среднего преобразования Фурье (Average-Fx) (7):

$$PS-X = \left|C_{X}(v_{k})\right|^{2} = \left|Average-Fx\right|^{2}$$

$$\tag{7}$$

Аналогично определяется функция среднего спектра мощности PS-Y (для направления Ү) (8):

$$PS-Y = \left|C_{Y}(u_{q})\right|^{2} = \left|Average-Fy\right|^{2}$$
(8)

мощности *PSD-X* Функция средней спектральной плотности (для направления Х), определяется соотношением (9):

$$PSD-X = \frac{|C_X(v_k)|^2}{\Delta v_k} = \frac{|C_X(v_k)|^2}{1/L_X} = \frac{PS-X}{1/L_X}$$
(9)

Аналогично определяется функция средней спектральной плотности мощности PSD-Y (для направления Y) (10):

$$PSD-Y = \frac{\left|C_{Y}(u_{q})\right|^{2}}{\Delta u_{q}} = \frac{\left|C_{Y}(u_{q})\right|^{2}}{1/L_{Y}} = \frac{PS-Y}{1/L_{Y}}$$
(10)

# 2.1.6.1. Активация метода Average FFT

Метод Average FFT активируется стандартным способом: либо через дерево методов, посредством двойного щелчка на Average FFT (Рис. 2-41), либо через главное меню, последовательным выбором пунктов Analysis  $\rightarrow$  Average FFT.

🖃 Average	
- Average FFT	
Average Profile	
🗄 Data Transformations	

Рис. 2-41. Активация Average FFT через дерево методов

В результате открывается окно Average FFT.

# 2.1.6.2. Окно Average FFT



Рис. 2-42. Окно Average FFT

Окно Average FFT (Рис. 2-42) содержит следующие элементы:

- Панель исходных 2D-данных, в которой отображается исходное изображение;
- Панель выходных 1D-данных, в которой отображается график Average FFT;

- Таблица, в которой отображаются результаты анализа графика Average FFT: положение первого максимума на кривой, уточненное значение положения первого максимума, значение функции в максимуме;
- Панель управления.

#### Панель управления Average FFT содержит:

- Параметр Orientation – задает направление, для которого вычисляется Average FFT, и имеет значения: X Fourier (по оси X), Y Fourier (по оси X), (Рис. 2-43)

Orientation	X Fourier 📃
	X Fourier
FFT Scaling	Y Fourier

Рис. 2-43. Значения параметра Orientation

- Параметр FFT Scaling – определяет, какая функция будет вычисляться, и отображаться на графике Average FFT: спектр модуля (модуль функции Average-Fx, Average-Fy), спектр мощности (PS-X, PS-Y), корень квадратный из модуля, логарифм (натуральный, десятичный) из спектра мощности, функция спектральной плотности мощности (PSD-X, PSD-Y). Значения, которые может иметь данный параметр, приведены на Рис. 2-44.

Табл. 2-5 содержит значения параметра **FFT Scaling** и соответствующие этим значениям функции, которые отображаются на графике **Average FFT** при этих значениях.



Рис. 2-44. Возможные значения параметра FFT Scaling

Значение параметра	Функция, отображаемая на графике Average FFT	
FFT Scaling		
Power Spectrum	средний спектр мощности:	
	$PS-X =  C_X(v_k) ^2 =  Average-Fx ^2$ (для направления X)	
	$PS-Y =  C_Y(u_q) ^2 =  Average-Fy ^2$ (для направления Y)	
Magnitude	средний спектр модуля (модуль среднего преобразования Фурье):	
	$ C_X(v_k)  =  Average-Fx  = \sqrt{PS-X}$ (для направления X)	
	$ C_{Y}(u_{q})  =  Average-Fy  = \sqrt{PS-Y}$ (для направления Y)	
Power Spectrum	средняя спектральная плотность мощности:	
Density	$PSD-X = \frac{PS-X}{\Delta v_k} = \frac{PS-X}{1/L_X}$ (для направления X)	
	$PSD-Y = \frac{PS-Y}{\Delta u_q} = \frac{PS-Y}{1/L_Y}$ (для направления Y)	
Sqrt Magnitude	корень квадратный из среднего амплитудного спектра:	
	$\sqrt{ C_X(v_k) } = \sqrt{\sqrt{PS-X}} = \sqrt{ Average-Fx }$ (для направления X)	
	$\sqrt{ C_Y(u_q) } = \sqrt{\sqrt{PS-Y}} = \sqrt{ Average-Fy }$ (для направления Y)	
Logarithmic	натуральный логарифм среднего спектра мощности:	
	ln( <i>PS-X</i> ) (для направления X)	
	ln( <i>PS-Y</i> ) (для направления Y)	
Decibel	десятичный логарифм относительного среднего спектра мощности:	
	10*log <sub>10</sub> ( <i>PS-X / Max</i> ) (для направления X)	
	10*log <sub>10</sub> ( <i>PS-Y</i> / <i>Max</i> ) (для направления Y)	
	Где <i>Мах</i> – максимальное значение <i>PS</i>	

Табл. 2-5. Функция, отображаемая на графике Average FFT, в зависимости от значения параметра FFT Scaling

- Параметр Subtract имеет значения (Рис. 2-45):
  - None для расчетов используется исходная функция, без какой либо предварительной обработки
  - Average перед тем как рассчитывать Average FFT, из исходной функции вычитается среднее значение.

Subtract	Average	-
	Average	
	None	

Рис. 2-45. Значения параметра Subtract

## 2.1.6.3. Paбoma Average FFT

При открытии окна Average FFT (Рис. 2-42), в зависимости от установленных параметров настройки, вычисляется среднее по строкам (в направлении X или Y) одномерное дискретное преобразование Фурье (*Average-Fx* или *Average-Fy*). В зависимости настройки, вычисляется и отображается на выходном графике Average FFT одна из следующих функций:

- спектр модуля (модуль функции Average-Fx, Average-Fy),
- спектр мощности (*PS-X*, *PS-Y*),
- корень квадратный из амплитудного спектра,
- логарифм (натуральный, десятичный) из спектра мощности,
- функция спектральной плотности мощности (PSD-X, PSD-Y).

На кривой Average FFT вычисляется положение первого максимума (параметр Initial Coarse Peak Position), значение отображается в таблице (Рис. 2-46). Рассчитывается уточненное значение для положения максимума (параметр More precise Initial Peak Position) с использованием обычного алгоритма расчета преобразования Фурье, в таблице значение приводится в пересчете на прямое пространство (в единицах длины).

Initial Coarse Peak Position	2478,3 nm
Position error	206,5 nm
More precise Initial Peak Position	2398,2 nm
Power Spectrum Maximum	74,2 nm^2

Рис. 2-46. Таблица с параметрами первого максимума на кривой Average FFT

Направление (параметр Orientation), для которого рассчитывается среднее преобразование Фурье, а также значения других параметров (FFT Scaling, Subtract), соответствуют тем значениям, которые были установлены ранее при последнем использовании Average FFT.

При изменении значений параметров Orientation, FFT Scaling, Subtract в интерактивном режиме будет изменяться результат - выходной график Average FFT.

Важным моментом является значение параметра Subtract. На приведенном примере Subtract= Average, т.е. для исходной функции выполняется предварительное вычитание среднего значения.

Если не сделать предварительного вычитания среднего значения (установить значение параметра **Subtract= None),** то максимумы, соответствующие периодичности структуры, будут слабо выражены на фоне максимума при нулевой пространственной частоте, обусловленного постоянной составляющей на исходном изображении. Это проиллюстрировано на примере Рис. 2-47, который отличается от примера Рис. 2-42 только тем, что значение параметра **Subtract= None**.



Рис. 2-47. Average FFT при значении параметра Subtract= None (без вычитания среднего значения)

В приведенных на Рис. 2-42, Рис. 2-47 примерах исходное изображение не имеет наклона (плоскость была предварительно вычтена). Если исходное изображение имеет наклон, то желательно предварительно его вычесть.

#### 2.1.6.4. Сохранение полученных результатов

Для сохранения, полученный результат (кривую Average FFT) следует отправить в Дерево фреймов в качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (п. <u>1.3.4</u>. Сохранение фреймов на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку **Send Data** на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку **ОК** создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки **Send Data**.
- Нажатие на кнопку OK+<Ctrl>+<Alt> создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

# 2.1.7. Average Profile – средний профиль вдоль заданного направления

Метод Average Profile рассчитывает средний профиль вдоль заданного направления (X или Y) для всего изображения, или для выделенной области. Выделение необходимой области производится при помощи стандартного инструмента Select Region (см. п. <u>2.1.2.1</u> Панель 2D-данных на стр. <u>65</u>).

Средний профиль вычисляется следующим образом.

Если  $Z(i, j) = Z(X_i, Y_j)$  функция исходного СЗМ-изображения, имеющая M точек по оси X и N точек по оси Y, то функции среднего профиля по X и Y, определяются как

$$Z(X_i)_X = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} Z(X_i, Y_j), \ i = [0, ..M - 1];$$
  
$$Z(Y_j)_Y = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} Z(X_i, Y_j), \ j = [0, ..N - 1].$$

# 2.1.7.1. Активация Average Profile

Метод Average Profile активируется стандартным способом: либо через дерево методов, посредством двойного щелчка на Average Profile (Рис. 2-48), либо через главное меню, последовательным выбором пунктов Analysis  $\rightarrow$  Average Profile.

⊡ · Average	
- Average FFT	
Average Profile	
🗄 Data Transformations	

Рис. 2-48. Активация метода Average Profile через дерево методов

В результате открывается окно Average Profile.



# 2.1.7.2. Окно Average Profile

Рис. 2-49. Окно Average Profile

Окно Average Profile содержит (Рис. 2-49):

- Панель исходных 2D-данных, в которой отображается исходное изображение;
- Панель выходных 1D-данных, в которой отображается график среднего профиля для заданного направления;
- Панель управления;

Панель управления Average Profile содержит:

- Параметр Orientation – задает направление (X или Y), для которого вычисляется средний профиль, и имеет два значения: X-Axis, Y-Axis.

#### 2.1.7.3. Сохранение полученных результатов

Для сохранения, полученный результат (кривую среднего профиля) следует отправить в Дерево фреймов в качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (п. <u>1.3.4</u>. Сохранение фреймов на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку Send Data на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку **ОК** создает в **Дереве фреймов** фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки **Send Data**.
- Нажатие на кнопку OK+<Ctrl>+<Alt> создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

### 2.1.8. Grain Analysis – метод анализа частиц

Metog Grain Analysis позволяет:

- получать сечения для всех частиц на одинаковом относительном уровне;
- находить основные геометрические параметры частиц, такие как площадь сечения, объем, средний размер, локальную высоту, максимальный размер, максимальную высоту, среднюю высоту, периметр и т.д.;
- получать гистограмму распределения по частицам для выбранного геометрического параметра.

Метод **Grain Analysis** предназначен для анализа СЗМ изображений частиц следующего типа:

- частицы находятся на базовой поверхности, которая является медленно меняющейся функцией, по сравнению с функцией, описывающей частицу;
- частицы являются «достаточно» выпуклыми (частица имеет один максимум, а горизонтальные сечения частицы могут быть и невыпуклыми фигурами, но такими, что любая линия, проведенная в плоскости сечения через точку максимума, делит фигуру сечения только на две части)

 частицы являются изолированными, могут иметься и отдельные соприкасающиеся или слипшиеся частицы, однако, обязательно, в окрестности любой частицы имеются точки, которые принадлежат базовой поверхности.

Существование в окрестности любой частицы точек, которые принадлежат базовой поверхности, позволяет ввести для каждой частицы локальный нулевой уровень, *Local MinZ*, который можно определить, как минимальное значение функции в локальной окрестности максимума частицы. В качестве локальной окрестности частицы рассматривается область вокруг максимума, имеющая размеры в несколько (4÷6) корреляционных длин. Корреляционная длина, *Lc*, рассчитывается из автокорреляционной функции как величина, на которой значение автокорреляционной функции убывает в *e* раз.

С учетом введенного локального нулевого уровня, *Local MinZ*, для каждой частицы отсчет высот точек поверхности частицы производится от своего локального нулевого уровня. Локальная высота частицы, определяется как разность между максимальным значением функции и значением локального минимума: *Local MaxZ* = *MaxZ* - *Local MinZ*.

Метод Grain Analysis работает следующим образом:

- Находятся все локальные максимумы *MaxZ*, производится их предварительная сортировка, при которой отсеиваются мелкие «шумовые» максимумы, каждый оставшийся максимум вместе с прилегающей областью отождествляется с отдельной частицей;
- Для каждого локального максимума (частицы) находится свой локальный нулевой уровень, *Local MinZ*, равный минимальному значению функции в окрестности частицы;
- Определяется высота каждой частицы, *Local MaxZ*, как разность между значением локального максимума и значением локального минимума:

Local MaxZ = MaxZ - Local MinZ;

- Исходя из заданного относительного уровня сечения, для каждой частицы определяется своя высота уровня сечения. Так, если относительный уровень сечения задан равным 0.5, то для каждой частицы производится сечение на высоте, равной половине высоты частицы. Если относительный уровень сечения установлен равным нулю, то для каждой частицы находится сечение, равное предельному сечению.
- Находятся основные геометрические параметры для каждой частицы: площадь, равная площади сечения; объем, максимальный размер, максимальная высота, средняя высота, периметр и т.д. Найденные значения выводятся в виде таблицы.
- Для выбранного геометрического параметра строится гистограмма плотности распределения.

Предельное сечение, соответствующее сечению при нулевом значении относительного уровня, определяется следующим образом. Для рассматриваемой частицы из точки максимума, как из центра, проводятся во всех направлениях радиальные сечения полуплоскостями, перпендикулярными плоскости XY. Для каждого радиального направления на кривой сечения находится участок с максимальным наклоном и через этот участок проводится касательная до пересечения с нулевым уровнем. Найденная таким образом точка пересечения касательной с нулевым уровнем принимается за граничную точку предельного сечения в рассматриваемом направлении. Совокупность найденных граничных точек для всех направлений образует границу предельного сечения.

Сечение, проведенное при любом возможном значении относительного уровня, не может выходить за пределы предельного сечения.

## 2.1.8.1. Активация Grain Analysis

Метод **Grain Analysis** активируется стандартным способом: либо через дерево методов, посредством двойного щелчка на **Grain analysis** (Рис. 2-50) либо через главное меню, последовательным выбором пунктов **Analysis** → **Grain** → **Grain analysis**.



Рис. 2-50. Активация метода Grain Analysis через дерево методов

В результате открывается окно Grain Analysis.

# 2.1.8.2. Окно Grain Analysis



Рис. 2-51. Вид окна Grain Analysis в начальный момент работы

Окно **Grain Analysis** в начальный момент работы показано Рис. 2-51, после завершения процедуры расчета – на Рис. 2-52

Окно Grain Analysis содержит следующие элементы:

- Панель исходного изображения (слева в верхней части окна);
- Панель результирующего изображения, в котором отображается изображение с сечениями на заданном уровне (в верхней части справа);
- Панель гистограммы, в которой для выбранного геометрического параметра отображается гистограмма плотности распределения по частицам;
- Таблица геометрических параметров частиц;
- Панель управления;
- Строка командных кнопок.



Рис. 2-52. Вид окна Grain Analysis после завершения процедуры расчета

## 2.1.8.3. Панель управления Grain Analysis

Панель управления содержит следующие элементы (Рис. 2-53):

Section level	0,50
Settings	
🗖 Auto redraw	Apply
Add or delete grain	1 -
Histogram bins	20
Histogram step = 0	.0000536 μm*μm.

Рис. 2-53. Панель управления

- Section level задает относительный уровень, на котором производится сечение. Величину этого параметра можно устанавливать в интервале от 0 (нулевая высота) до 1 (максимальная высота). По умолчанию, Section level имеет значение равное 0.5, при этом значении сечение для каждой частицы производится на уровне половины высоты частицы;
- Setting открывает диалоговое окно настройки параметров процедуры расчета сечений;
- Арріу запускает процедуру расчета;
- Auto redraw включает/выключает автоматический запуск процедуры расчета при изменении параметров настройки;
- Add or delete grain удаляет/восстанавливает на результирующем изображении частицу, номер которой указан в поле ввода, при щелчке на кнопке, расположенной справа от поля ввода;
- Histogram bins задает число частичных интервалов на гистограмме распределения для выбранного геометрического параметра;
- **Histogram step** отображает значение длины частичного интервала, которое соответствует установленному числу интервалов

## 2.1.8.4. Таблица геометрических параметров

Таблица (Рис. 2-54) содержит основные геометрические характеристики для каждой частицы (Area, Volume, и т. д., более подробно смотри ниже). Каждая строка соответствует определенной частице и содержит значения ее геометрических параметров. В первом столбце указан номер частицы, каждый последующий столбец соответствуют определенному параметру, два последних столбца содержат координаты частицы.

Первая строка – названия параметров; во второй строке, **Average** –средние значения параметров; в третьей, **SD** – величина стандартного отклонения для средних значений.

	Area µm*µm	AverageSize µm	Volume µm*µm*nm	Zrange nm	LocalMaxZ nm	MaxZ nm	LocalMinZ nm	MeanZ nm	
Average	0.000557	0.0234	0.00196	5.452	10.905	11.381	0.476	9.339	[
SD	0.000122	0.00290	0.000812	1.314	2.628	2.634	0.106	2.174	i
1	0.000934	0.0305	0.00583	10.083	20.166	20.971	0.805	17.137	1
2	0.00104	0.0322	0.00643	9.968	19.898	20.626	0.728	16.831	Ī
3	0.00110	0.0332	0.00618	9.163	18.288	18.901	0.613	15.335	I
4	0.000719	0.0268	0.00410	9.086	18.134	18.594	0.460	15.220	Ī
5	0.00110	0.0332	0.00601	8.894	17.828	18.556	0.728	15.105	
6	0.000765 K	0.0276	0.00413	8.703	17.406	17.866	0.460	14.569	Î
7	0.000674	0.0259	0.00341	8.549	17.099	17.674	0.575	14.185	Ī
8	0.000689	0.0262	0.00359	8.549	17.137	17.674	0.536	14.339	Ī
9	0.000781	0.0279	0.00411	8.549	17.099	17.636	0.536	14.339	Ŀ
								• •	

Рис. 2-54. Таблица геометрических параметров зерен
Если щелкнуть на определенной частице на исходном изображении либо на изображении сечения, то на обоих этих изображениях данная частица будет выделена. Одновременно происходит позиционирование таблицы: в видимом поле таблицы появляется область со строкой, соответствующей выделенной частице (на примере Рис. 2-54 выделена частица №5). При этом и в поле ввода Add or delete grain (удаления/восстановления частицы) устанавливается номер выделенной частицы. Аналогично, при выделении определенной строки таблицы происходит выделение частицы, соответствующей этой строке на изображениях.

Геометрические параметры частиц, содержащиеся в таблице параметров:

- Area площадь сечения частицы на высоте, соответствующей заданному значению относительного уровня;
- Average Size характерный размер частицы, определяемый как корень квадратный из площади сечения;
- **Volume** объем частицы;
- **Z Range** интервал значений Z, определяемый как разность между значением локального максимума, **Мах Z**, и высотой уровня сечения;
- Local Max Z высота частицы, отсчитанная от локального нулевого уровня, Local MaxZ = MaxZ Local MinZ;
- **Мах Z** значение локального максимума, высота частицы, отсчитанная от общего нулевого уровня;
- Local Min Z локальный нулевой уровень, равный минимальному значению функции в окрестности локального максимума;
- **Меап Z** среднее значение Z по точкам частицы;
- **Diameter** эффективный диаметр, определяемый как диаметр окружности, площадь которой равна площади сечения, Diameter =  $2\Box\sqrt{\text{Area}/\pi}$ ;
- Length максимальный размер сечения (максимальное расстояние между двумя точками сечения);

Mean Width – эффективная ширина, определяемая как ширина (меньшая сторона) прямоугольника, площадь которого равна площади сечения, а длина (большая сторона) равна максимальному размеру частицы (Length): Mean Width = Area/Length;

**Perimeter** – периметр сечения;

Aspect Ratio – отношение максимального размера (Length) к эффективной ширине (Mean Width):

Aspect Ratio = Length/ Mean Width;

- X Size размер сечения по X;
- Y Size размер сечения по Y;

Center X, Center Y – X, Y координаты частицы (локального максимума)

# 2.1.8.5. Гистограмма

На панели гистограммы, отображается гистограмма плотности распределения по частицам (Рис. 2-55) для выбранного геометрического параметра (на рисунке выбран параметр **Area**).



Рис. 2-55. Гистограмма плотности распределения для выбранного геометрического параметра

Выбор геометрического параметра, для которого строится гистограмма, производится в списке выбора на панели инструментов, расположенной над гистограммой (Рис. 2-56).



Рис. 2-56. Список выбора параметра

#### Число интервалов

Число частичных интервалов, на которое разбивается область значений геометрического параметра, задается в поле ввода значений параметра **Histogram bins** (Рис. 2-57), на панели управления. На приведенном примере (Рис. 2-55, Рис. 2-57) число частичных интервалов, **Histogram bins**, равно 20, и как видно на гистограмме, область значений параметра **Area** разбита на 20 частей.



Рис. 2-57. поле ввода значений параметра Histogram intervals

Ниже отображается значение длины частичного интервала, **Histogram step**, соответствующее установленному числу частичных интервалов для выбранного геометрического параметра.

#### 2.1.8.6. Панель инструментов гистограммы

Панель инструментов гистограммы (Рис. 2-58) находится над гистограммой и содержит набор кнопок, стандартных для панели инструментов 1D-данных (раздел 2.1.2.2 на стр. <u>66</u> Табл. 2-2 на стр. <u>67</u>), а также список выбора геометрического параметра (Рис. 2-56), и кнопку **Ф** Adjustment...





Кнопка **Settings...** открывает диалоговое окно **Table Params Settings** (Рис. 2-59). Это окно служит для выбора геометрических параметров, которые будут рассчитываться, и отображаться в Таблице геометрических параметров частиц.

🛕 Table Params Settin	gs	×
Area	Y	
AverageSize		
Length		
MeanWidth		
AspectRatio		
Volume		
Zrange		
LocalMaxZ		
MaxZ		
LocalMinZ		
MeanZ		
LocalMeanZ		
Perimeter		
Diameter		
XSize		
YSize		
CenterX		
CenterY		
	ок с	ancel

Рис. 2-59.Окно выбора геометрических параметров, отображаемых в Таблице геометрических параметров частиц

# 2.1.8.7. Control of computational procedure parameters - окно настройки параметров процедуры расчета

Окно Control of computational procedure parameters – Окно настройки процедуры расчета (Рис. 2-60) открывается кнопкой Setting на панели управления (Рис. 2-53)

Control of computational proce	dure parameters	×
Setting selection Standard 1	-	Рекомендуется для следующего класса частиц: -частицы являются изолированными и/или отдельными слипшимися, -каждая частица имеет один максимум, частцы
Minimal distance (Lc)	0,250	являются достаточно выпуклыми, -максимальный и минимальный размеры частицы различаются не сильно
Rq coefficient	1,000	,
Max X size of grain (Lc)	4,000	Control Parameters
Max Y size of grain (Lc)	4,000	
Crop level	0,700	
Unification of Graines	•	Save Ok Cancel

Рис. 2-60. Окно настройки процедуры расчета

Окно настройки процедуры расчета содержит следующие элементы (Рис. 2-60):

- Setting Selection выбор типа настройки. Краткое описание типа поверхности, которому соответствует выбранный тип настройки, приводится в поле, справа от Setting selection.
- Параметры процедуры расчета:
  - Minimal distance (Lc),
  - Rq coefficient,
  - Max X size of grain (Lc),
  - Max Y size of grain (Lc),
  - Crop level,
  - Unification of Grains;
- Поле Control Parameters, в котором отображаются такие параметры, как корреляционная длина (Lc) и среднеквадратичная шероховатость (Rq);
- Командные кнопки:
  - Save для сохранения подобранной настройки параметров и выхода из окна настройки, при этом значению параметра Setting selection соответствует новый набор параметров настройки, который сохраняется и при выходе из программы;

- Ok для подтверждения имеющейся текущей настройки, и выхода из окна настройки. Текущая настройка при этом сохраняется до выхода из модуля;
- СапсеІ выход из окна настройки, без сохранения текущих параметров настройки.

#### Параметры процедуры расчета

#### Minimal distance (L<sub>c</sub>)

Параметр Minimal distance (Lc) служит для отсева второстепенных максимумов, лежащих вблизи основного максимума, на вершине частицы. Параметр задает круговую локальную окрестность вблизи основного максимума, в долях корреляционной длины,  $L_c$ . Если в этой окрестности оказываются максимумы, сопутствующие основному максимуму, но имеющие меньшую высоту, то они отсеиваются. Значение параметра  $L_c$  выводится в поле Control Parameters.

#### **Rq coefficient**

Параметр **Rq coefficient** служит для отсева «мелких шумовых» максимумов лежащих в областях, имеющих низкую высоту, например, долинах. Отсев мелких максимумов производится по критерию:

- если Max Z < (Rq coefficient)\*Rq, то локальный максимум считается шумовым и отсеивается,</li>
- если Max Z ≥ (Rq coefficient)\*Rq, то локальный максимум считается отдельной частицей, где Rq среднеквадратичная шероховатость поверхности. Значение параметра Rq для исходного изображения выводится в поле Control Parameters

#### Max X size of grain (Lc) и Max Y size of grain (Lc)

Параметры Max X size of grain (Lc) и Max Y size of grain (Lc) задают размеры локальной области, лежащей около максимума. Эта область имеет форму эллипса, ориентированного осями по X и Y. Параметр Max X size of grain (Lc) задает размер оси эллипса по X, а Max Y size of grain (Lc) – размер оси эллипса по Y. Значения задаются в долях корреляционной длины Lc.

Для каждой частицы в заданной локальной области находится точка с минимальной высотой. Значение функции в этой точке принимается за локальный нулевой уровень, от которого отсчитывается высота частицы.

В алгоритме расчета сечения задается начальная ограничительная область, в пределах которой ищется сечение частицы. Сечение не может выходить за пределы этой области. Начальная ограничительная область совпадает с локальной областью. Таким образом, параметры Max X size of grain (Lc) и Max Y size of grain (Lc) одновременно задают и начальную ограничительную область.

**Локальная область** должна иметь такие размеры, чтобы в ней помещались полностью самые большие частицы. Обычно, этому требованию соответствуют размеры локальной области около 4 – 6 корреляционных длин.

#### **Crop level**

В алгоритме поиска предельного сечения частицы (сечения при нулевой высоте частицы) из точки максимума частицы для всех направлений стоятся радиальные сечения. Для каждой кривой сечения находится точка, в которой кривая сечения имеет максимальный наклон, через эту точку проводится касательная, точка пересечения которой с локальным нулевым уровнем принимается за граничную точку предельного сечения для этого направления.

Для нормальной работы алгоритма, в случае «сложных» частиц, когда верхушка частицы кроме основного максимума имеет еще и второстепенные, следует на кривых сечений отсечь сверху ту часть верхушки, где функция является немонотонной, чтобы поиск точки максимального наклона начинался с начала монотонной части кривой сечения.

Параметр **Crop level** как раз и служит для этой цели. Он задает уровень, выше которого производится отсечение верхушки кривой радиального сечения, и, при анализе кривой сечения, поиск точки максимального наклона начинается от точки лежащей ниже этого уровня.

#### **Unification of Grains**

Флажок Unification of Grains включает/отключает процедуру объединения сечений близко расположенных частиц, если сечение более высокой частицы содержит точку максимума более низкой частицы.

#### Setting selection - выбор типа настройки

#### Значения параметра Setting selection

Параметр Setting selection – выбор типа настройки, может иметь одно из шести значений (Рис. 2-61):

- Standard 1;
- Standard 2;
- Standard 3;
- User 1;
- User 2;
- User 3.



Рис. 2-61. Выбор значения параметра Setting selection

При выборе определенного значения параметра **Setting selection**, устанавливается соответствующий ему набор значений параметров процедуры расчета и в поле, расположенном справа от **Setting selection**, отображается краткое описание типа поверхности, которой соответствует эта настройка.

При открытии окна Grain Analysis, по умолчанию, устанавливается настройка Standard 1 с набором параметров, соответствующим этой настройке. Поэтому, если после открытия окна Grain Analysis сразу запустить процедуру расчета, то вычисления будут производиться при значениях параметров, соответствующих настройке Standard 1.

#### Изменение значений параметров процедуры расчета

Для изменения значений параметров процедуры расчета следует кнопкой Setting открыть окно настройки параметров процедуры расчета Control of computational procedure parameters.

Далее можно либо установить целиком другой набор параметров настройки выбором другого значения параметра **Setting selection**, либо, не меняя значения параметра **Setting selection**, изменить значения нужных параметров.

При закрытии окна настройки параметров посредством кнопки OK установленному значению параметра Setting selection будет соответствовать текущий набор значений параметров расчета, и этот набор будет использоваться в расчетах до выхода из модуля Grain Analysis.

При выходе из окна настройки параметров процедуры расчета посредством кнопки SAVE для установленного значения параметра Setting selection будет изменен набор значений параметров расчета на текущий, которой сохраняется и при выходе из модуля и из программы.

#### Настройка Standard 1

Параметры настройки Standard 1 имеют значения, приведенные на Рис. 2-60.

Настройка Standard 1 рекомендуется для следующего класса частиц:

- частицы являются изолированными и/или отдельными слипшимися,
- каждая частица имеет один максимум,
- максимальный и минимальный размеры частицы различаются не сильно,
- сечение частицы может быть и не выпуклой фигурой, но, любая линия, проведенная в плоскости сечения через точку максимума, делит сечение только на две части.

Примеры такого типа поверхности приведены на Рис. 2-62 (относительный уровень сечения 0.5), Рис. 2-63 (относительный уровень сечения 0) и Рис. 2-64 (относительный уровень сечения 0.5 + установлен флажок Unification of Grains –объединение сечений близко расположенных частиц).



Рис. 2-62. Пример сечения при относительном уровне сечения 0.5 и значениях параметров настройки Standard 1



Рис. 2-63. Пример сечения при относительном уровне сечения 0.0 и значениях параметров настройки **Standard 1** 



Рис. 2-64. Пример сечения при относительном уровне сечения 0.5, значениях параметров настройки **Standard 1** и установленном флажке **Unification of Grains** (сечения близко расположенных частиц объединяются)

#### Настройка Standard 2

Настройка **Standard 2** с параметрами, приведенными на Рис. 2-65 рекомендуется для частиц имеющих сферическую форму и являющихся соприкасающимися. Примеры такого типа поверхности приведены на Рис. 2-66 (относительный уровень сечения 0.5) и Рис. 2-67 (относительный уровень сечения 0).

A Control of computational proce	dure parameters		×
Setting selection Standard 2	•	рекомендуется для частиц имеющих сферическую форму и являющихся соприкасающимися	_
Minimal distance (Lc)	1,000		
Rq coefficient	1,000		
Max X size of grain (Lc)	4,000	Control Parameters	
Max Y size of grain (Lc)	4,000	Ng = 130.009 min	
Crop level	0,400		
Unification of Graines		Save Ok Cance	3

Рис. 2-65. Настройка Standard 2



Рис. 2-66. Пример сечения при относительном уровне сечения 0.5 и значениях параметров настройки **Standard 2** 



Рис. 2-67. Пример сечения при относительном уровне сечения 0 и значениях параметров настройки **Standard 2** 

#### Настройка Standard 3

Настройка Standard 3 с параметрами, приведенными на Рис. 2-68 рекомендуется для частиц имеющих вытянутую форму, ориентированных преимущественно в направлении оси Y, вершина частиц может иметь, кроме основного максимума и сопутствующие локальные максимумы.

Пример такого типа поверхности приведен на Рис. 2-66 (относительный уровень сечения 0.5) и Рис. 2-67 (относительный уровень сечения 0)

В этой настройке значение Max X size of grain (Lc) установлено большим, чем значение параметра Max X size of grain (Lc), что позволяет учесть анизотропию. Если частицы имеют ориентацию в направлении оси X, то следует установить большим значение параметра Max X size of grain (Lc). Примеры такого типа поверхности

приведены на Рис. 2-62 (относительный уровень сечения 0.5), Рис. 2-70 (относительный уровень сечения 0.5, флажок Unification of Grains снят, т.е. сечения близко расположенных частиц не объединяются) и Рис. 2-71 (относительный уровень сечения 0.0 + установлен флажок Unification of Grains – объединения сечений близко расположенных частиц)

A Control of computational proce	edure parameters		×
Setting selection Standard 3	•	рекомендуется для частиц, имеющих вытянутую форму, ориентированных преимущественно в направлении оси <sup>У</sup> , вершина частиц может	
Minimal distance (Lc)	0,500	иметь, кроме основного максимума и сопутствующие локальные максимумы.	
Rq coefficient	1,400		
Max X size of grain (Lc)	7,000	Control Parameters	_
Max Y size of grain (Lc)	14,000		
Crop level	0,500		
Unification of Graines	· 🔽	Save Ok Canc	el

Рис. 2-68. Настройка Standard 3



Рис. 2-69. Пример сечения при относительном уровне сечения 0.5 и значениях параметров настройки **Standard 3** 



Рис. 2-70. Пример сечения при относительном уровне сечения 0.5 и значениях параметров настройки **Standard 3** и снятом флажке **Unification of Grains** (сечения близко расположенных частиц не объединяются)



Рис. 2-71. Пример сечения при относительном уровне сечения 0.0 и значениях параметров настройки **Standard 3** 

## 2.1.8.8. Строка командных кнопок

Строка командных кнопок (Рис. 2-72), расположенная в нижней части окна, кроме стандартных кнопок, **Ok, Cancel, Help**, содержит кнопки **SaveTabData** и **SetInDate**.



Рис. 2-72. Командная строка

#### SaveTabData

Кнопка **SaveTabData** копирует данные таблицы геометрических параметров (см. п. <u>2.1.8.4</u> Таблица геометрических параметров на стр. <u>108</u>) в буфер. Затем, открыв какую-либо стандартную программу, работающую с электронными таблицами, например Microsoft Office Excel или Origin, можно эти данные из буфера вставить в виде электронной таблицы. Данные из буфера можно также вставить в виде текстовой таблицы в стандартный документ Word.

#### SetInData

Кнопка SetInData восстанавливает данные исходного изображения, если ранее к исходному изображению применялась медианная фильтрация (установлен флажок Include median filter на панели инструментов исходного изображения).

#### 2.1.8.9. Сохранение полученных результатов

Для сохранения, полученные данные следует отправить в Дерево фреймов в качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (п. <u>1.3.4</u> Сохранение фреймов на стр. 19).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку Send Data на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку **ОК** создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки **Send Data**.

Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl>+<Alt> - создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

## 2.1.9. FFT analysis – Фурье анализ

Анализ Фурье спектра позволяет получить информацию о структурных свойствах поверхности, в частности о периодичности структуры, а также о шумах, искажающих изображение поверхности.

Метод FFT Analysis для исходной 2D-функции (функции двух переменных, X, Y) вычисляет дискретное преобразование Фурье, которое является функцией двух переменных – пространственных частот. В зависимости от выбора, вычисляются и отображаются различные двумерные Фурье-функции:

- спектр модуля преобразования Фурье;
- спектр мощности, равный квадрату модуля преобразования Фурье;
- корень квадратный из модуля преобразования Фурье;
- логарифм (натуральный, десятичный) из спектра мощности.

На основе двумерного спектра мощности рассчитываются различные одномерные функции спектральной плотности мощности.

# 2.1.9.1. Основные соотношения и определения, используемые для расчета Фурье спектра

Дискретное прямое преобразование Фурье (ДП $\Phi \equiv C(v_k, u_q)$ ) для дискретной функции двух переменных определяется соотношением:

$$C(v_{k}, u_{q}) = C(k, q) = \frac{1}{N_{X}N_{Y}} \sum_{n=0}^{N_{X}-1} \sum_{m=0}^{N_{Y}-1} Z(X_{n}, Y_{m}) \exp[-i2\pi(X_{n}v_{k} + Y_{m}u_{q})] =$$

$$= \frac{1}{N_{X}N_{Y}} \sum_{n=0}^{N_{X}-1} \sum_{m=0}^{N_{Y}-1} Z(X_{n}, Y_{m}) \exp[-i2\pi(\frac{kn}{N_{X}} + \frac{qm}{N_{Y}})]$$
(1)

где:

 $Z(X_n, Y_m)$  – исходная дискретная функция двух переменных (*X*, *Y*), заданная следующим образом:

- по *X* на интервале длиной *L<sub>X</sub>*, в *N<sub>X</sub>* точках (*n*=0, 1. 2, … *N<sub>X</sub>* -1), с одинаковым шагом △X;
- по *Y* на интервале длиной  $L_Y$ , в  $N_Y$  точках (*m*=0, 1. 2, ...  $N_Y$  -1), с одинаковым шагом  $\triangle Y$ ;

$$v_k = k \frac{1}{L_X}$$
,  $u_q = q \frac{1}{L_Y}$  – пространственные частоты по X, Y;  
 $\Delta v_k = \frac{1}{L_X}$ ,  $\Delta u_q = \frac{1}{L_Y}$  – приращения пространственных частот.

Если прямое дискретное преобразование Фурье (ДПФ) определено соотношением (1), то обратное дискретное преобразование Фурье (ОДПФ) определяется соотношением:

$$O\Pi \Phi = Z(X_n, Y_m) = \sum_{k=0}^{N_X - 1} \sum_{q=0}^{N_Y - 1} C(v_k, u_q) \exp[i2\pi (X_n v_k + Y_m u_q)] =$$
  
=  $\sum_{k=0}^{N_X - 1} \sum_{q=0}^{N_Y - 1} C(v_k, u_q) \exp[i2\pi (\frac{kn}{N_X} + \frac{qm}{N_Y})]$  (2)

При вычислении функции  $C(v_k, u_q)$  используется алгоритм быстрого преобразования Фурье (**FFT – Fast Fourier Transform**).

Функция  $C(v_k, u_a)$  является комплексной функцией:

$$C(v_k, u_q) = \operatorname{Re}(C(v_k, u_q)) + i \operatorname{Im}(C(v_k, u_q)) = |C(v_k, u_q)| \exp(i \arg C(v_k, u_q))$$
(3)

где i – мнимая единица,  $\operatorname{Re}(C(v_k, u_q))$  – действительная часть функции  $C(v_k, u_q)$ ,  $\operatorname{Im}(C(v_k, u_q))$  – мнимая часть функции  $C(v_k, u_q)$ .

Функцию квадрата модуля преобразования Фурье называют спектром мощности. Обозначим ее как *PS*:

$$PS = PS(v_k, u_q) = \left| C(v_k, u_q) \right|^2 \tag{4}$$

Функция спектральной плотности мощности **PSD** определяется соотношением:

$$PSD = PSD(v_k, u_q) = \frac{\left|C(v_k, u_q)\right|^2}{\Delta v_k \cdot \Delta u_q}$$
(5)

Спектром модуля назовем функцию модуля преобразования Фурье, обозначим ее как *Magnitude*:

$$Magnitude = \left| C(v_k, u_q) \right| \tag{6}$$

Спектральной функцией, или спектральной плотностью  $S(v_k, u_q)$  называют отношение  $C(v_k, u_q)$  к приращениям частот:

$$S(v_k, u_q) = \frac{C(v_k, u_q)}{\Delta v_k \cdot \Delta u_q}$$
(7)

Амплитудным спектром  $\rho(v_k, u_q)$  называют модуль спектральной функции (8), а фазовым спектром  $\phi(v_k, u_q)$  – взятый с обратным знаком аргумент спектральной функции (9), т.е.

$$\rho(v_k, u_q) = \left| S(v_k, u_q) \right| = \frac{\left| C(v_k, u_q) \right|}{\Delta v_k \cdot \Delta u_q} \tag{8}$$

И

$$\phi(v_k, u_q) = -\arg S(v_k, u_q) = -\arg C(v_k, u_q)$$
(9)

# 2.1.9.2. Активация FFT Analysis

Метод Fourier Analysis активируется стандартным способом: либо через дерево методов, посредством двойного щелчка на строке FFT Analysis (Рис. 2-73), либо через главное меню, последовательным выбором пунктов Analysis  $\rightarrow$  Fourier  $\rightarrow$  FFT Analysis.

🖶 Fourier	
FFTAnalysis	
FFTFiltration	
🛨 Grain	

Рис. 2-73. Активация FFT Analysis через дерево методов

В результате открывается окно FFT Analysis.

# 2.1.9.3. Окно FFT Analysis



Рис. 2-74. Окно FFT Analysis

Окно FFT Analysis (Рис. 2-74) содержит следующие элементы:

- Левая панель данных, в которой, в зависимости от вкладки, отображаются: исходное изображение (Input Image), профиль сечения Фурье-изображения (FFT Sections), выполненного при помощи инструмента Center Section, различные функции спектральной плотности мощности (RadPSD, 2DPSD, PSDX, PSDY);
- Правая панель данных, в которой отображается Фурье-изображение (FFT Image);
- Панель управления;
- Поля вывода данных расчета и измерений, расположенные под левой и правой панелями;
- Строка командных кнопок.

# 2.1.9.4. Панель управления модуля FFT Analysis

Панель управления модуля **FFT Analysis** содержит следующие элементы (Рис. 2-75):



Рис. 2-75. Панель управления модуля FFT Analysis

#### Параметр FFT Scaling

Параметр **FFT Scaling** – определяет, какая функция отображается в качестве Фурьеизображения: спектр модуля преобразования Фурье, спектр мощности, корень квадратный из модуля, логарифм (натуральный, десятичный) из спектра мощности.

Значения параметра **FFT Scaling** (Рис. 2-76) и соответствующие этим значениям функции, отображаемые в качестве Фурье-изображения, приведены в Табл. 2-6

FFT Scaling	
Power Spectrum	
Power Spectrum	ζ
Magnitude	
Sqrt Magnitude	
Logarithmic	
Decibel	

Рис. 2-76. Возможные значения параметра FFT Scaling

Значение параметра	Функция, отображаемая в качестве Фурье-изображения
FFT Scaling	
Power Spectrum	спектр мощности:
	$PS(v_k, u_q) = \left  C(v_k, u_q) \right ^2,$
	где $C(v_k, u_q)$ – преобразование Фурье исходной функции
Magnitude	спектр модуля преобразования Фурье:
	$Magnitude =  C(v_k, u_q)  = \sqrt{PS}$
Sqrt Magnitude	корень квадратный из спектра модуля:
	$\sqrt{Magnitude} = \sqrt{ C(v_k, u_q) } = \sqrt{\sqrt{PS}}$
Logarithmic	натуральный логарифм спектра мощности:
	$\ln(PS)$
Decibel	десятичный логарифм относительного спектра мощности:
	$10*\log_{10}(PS/Max),$
	где <i>Мах</i> – максимальное значение <i>PS</i>

Табл. 2-6. Значения параметра FFT Scaling и соответствующие этим значениям функции, отображаемые в качестве Фурье-изображения

# **Type Of Subtract**

Параметр Туре Of Subtract – принимает значения (Рис. 2-77):

- None преобразование Фурье производится над исходной функцией, без предварительной обработки;
- Average перед преобразованием Фурье над исходной функцией производится предварительная обработка вычитание среднего значения;
- **Plane** перед преобразованием Фурье над исходной функцией производится предварительная обработка вычитание плоскости;
- 2 Order перед преобразованием Фурье над исходной функцией производится предварительная обработка – вычитание поверхности второго порядка;
- **3 Order** перед преобразованием Фурье над исходной функцией производится предварительная обработка вычитание поверхности третьего порядка.

TypeOfSubtract	Ł
Average	
None V	
Average	
Plane	
2 Order	
3 Order	

Рис. 2-77. Значения параметра **Subtract** 

#### <u>Кнопка Calc2DFFT</u>

Кнопка **Calc2DFFT**, **Calc2DFFT**, запускает процедуру расчета преобразования Фурье и обратного преобразования Фурье.

# 2.1.9.5. Левая панель. Вкладки: Input Image, FFT Sections, RadPSD, 2DPSD, PSD-X, PSD-Y

Левая панель содержит вкладки: Input Image, FFT Sections, RadPSD, 2DPSD, PSD-X, PSD-Y. При запуске модуля FFTAnalysis, по умолчанию открывается вкладка Input Image, на которой отображается исходная функция.

#### Вкладка FFT Sections

На вкладке **FFT Sections** (Рис. 2-78) отображается профиль сечения, проведенного на Фурье-изображении (на правой панели) при помощи инструмента **Center Section**.



Рис. 2-78. Слева – вкладка FFT Sections с профилем сечения Фурье-изображения, справа – Фурье-изображение с линией сечения

#### График профиля сечения, использование одиночного маркера

Одиночный (Рис 2-79) <sup>.</sup>	маркер	включается	кнопкой	∀ на	панели	инструментов
(1 110. 2 77).	Input Im	age FFTSections	RADPSD 2DPS	D PSDX 1	PSDY	
		s sí 🌣				

Рис. 2-79. Включение одиночного маркера

Если на кривой профиля сечения (Рис. 2-78) имеется выделенная маркером точка, то под графиком кривой профиля сечения, для этой точки отображаются (Рис. 2-80):

- Low Freq значение пространственной частоты (значение аргумента);
- Long Wl значение длины волны (величина обратная аргументу);
- Ү1-значение функции.

FFT Sect measurement	N
Low Freq = 3.655 1/nm Long WI = 0.273 nm Y1 = 0.00370 nm	4

Рис. 2-80. Значения функции, пространственной частоты и длины волны в точке кривой профиля сечения, отмеченной маркером

# Input Image FFTSections RADPSD 2DPSD PSDX PSDY

#### График профиля сечения, использование двойного маркера

Рис. 2-81. График профиля сечения, использование двойного маркера

Двойной маркер включается кнопкой 🔀 на панели инструментов (Рис. 2-82):

Input Image	FFTSections	RADPSD	2DPSD	PSDX	PSDY
▽ 22 5	ά į				
13					

Рис. 2-82. Включение двойного маркера

Если на кривой профиля сечения (Рис. 2-81) имеются точки, выделенные двойным маркером, то под графиком отображаются (Рис. 2-83):

 Low Freq – значение пространственной частоты (значение аргумента) в первой точке (в точке, расположенной на графике слева);

- Long Wl значение длина волны (величины обратной аргументу) в первой точке;
- Y1 значение функции в первой точке;
- High Freq значение пространственной частоты во второй точке;
- Short Wl значение длины волны во второй точке;
- У2 значение функции во второй точке;

FFT Sect measurement
Low Freq = 3.655 1/nm
Long WI = 0.273 nm
Y1 = 0.0000203 nm^2
High Freq = 7.694 1/nm
Short WI = 0.129 nm
Y2 = 0.000000000106 nm^2



#### Вкладка RadPSD

На вкладке **RadPSD** (Рис. 2-84) отображается радиальная функция спектральной плотности мощности *RadPSD*.



Рис. 2-84. Вкладка **RadPSD** – отображение радиальной функции спектральной плотности мощности *RadPSD* 

#### Определение функции RadPSD

Радиальная функция спектральной плотности мощности **RadPSD** определяется как сумма значений спектральной плотности мощности  $PSD(v_k, u_q)$  (пункт <u>2.1.9.1</u>) всех точек  $(v_k, u_q)$ , лежащих в кольце пространственных частот:  $f_i \leq \sqrt{v_k^2 + u_q^2} \leq f_i + \Delta f$ , умноженная на приращение частоты  $\Delta f$  (считается, что  $\Delta f = \Delta v_k = \Delta u_q$ ). Если функцию **RadPSD** определять через функцию спектра мощности, то она равна сумме значений спектра мощности  $PS(v_k, u_q)$  (пункт 2.1.9.1) всех точек  $(v_k, u_q)$ , лежащих в кольце пространственных частот:  $f_i \leq \sqrt{{v_k}^2 + {u_q}^2} \leq f_i + \Delta f$ , деленной на приращение частоты  $\Delta f$ .

#### График функции RadPSD, использование одиночного маркера

Использование одиночного маркера аналогично случаю функции *профиля сечения* на вкладке **FFT Sections.** 

#### График функции RadPSD, использование двойного маркера (Рис. 2-85)



Рис. 2-85. График RadPSD, использование двойного маркера

Если включен двойной маркер, то под графиком отображаются следующие величины (Рис. 2-86):

RADPSD measurement
Low Freq = 2.500 1/nm
Long WI = 0.399 nm
Y1 = 0.0000454 nm*3
High Freq = 6.733 1/nm
Short WI = 0.148 nm
Y2 = 0.00000127 nm*3
Total Power = 0.000593 nm*2
Equivalent Sq = 0.0243 nm
Power Between Cursors = 0.000529 nm*2
Equivalent Sq = 0.0230 nm

Рис. 2-86. Параметры, отображаемые при использовании двойного маркера

Low Freq – пространственная частота в первой точке (в точке, расположенной на графике слева);

- Long WL длина волны, соответствующая пространственной частоте в первой точке;
- У1 значение функции в первой точке;
- High Freq пространственная частота во второй точке ;
- Short WL длина волны, соответствующая пространственной частоте во второй точке;
- У2 значение функции во второй точке;
- Total Power сумма значений спектра мощности  $PS(v_k, u_q)$  по всем пространственным частотам;
- Equivalent RMS эквивалентная среднеквадратичная шероховатость, определяемая из соотношения: Equivalent RMS= (Total Power)<sup>1/2</sup>;
- Power Between Cursors сумма значений спектра мощности  $PS(v_k, u_q)$  по всем значениям пространственных частот, лежащих в кольце:

$$f_1 = LowFrq \le \sqrt{v_k^2 + u_q^2} \le f_2 = HighFrq$$

- Equivalent RMS Between Cursors - эквивалентная среднеквадратичная шероховатость, определяемая из соотношения:

Equivalent RMS Between Cursors = (Power Between Cursors)<sup>1/2</sup>

#### **Вкладка 2DPSD**

На вкладке **2DPSD** (Рис. 2-87) отображается функция спектральной плотности мощности **2DPSD**.



Рис. 2-87. Вкладка 2DPSD – отображение функции спектральной плотности мощности 2DPSD

#### Определение функции 2DPSD

Функция спектральной плотности мощности **2DPSD** определяется как сумма значений спектральной плотности мощности  $PSD(v_k, u_q)$  (пункт 2.1.9.1) всех точек  $(v_k, u_q)$ , лежащих в кольце пространственных частот:  $f_i \leq \sqrt{v_k^2 + u_q^2} \leq f_i + \Delta f$ , деленная на число точек, лежащих в этом кольце (считается, что  $\Delta f = \Delta v_k = \Delta u_q$ ). Эта функция равна описанной выше радиальной функции спектральной плотности мощности **RadPSD**, деленной на  $2\pi f_i$ .

#### График функции 2DPSD, использование маркеров

Использование маркеров аналогично случаю функции *RadPSD* (стр. 129).

#### Вкладка PSDX

На вкладке **PSDX** (Рис. 2-88) отображается одномерная функция спектральной плотности мощности *PSD-X* 



Рис. 2-88. Вкладка PSDX – отображение функции спектральной плотности мощности PSD-X

#### Определение функции PSD-X

Функция спектральной плотности мощности **PSD-X** является функцией только одной пространственной частоты  $v_k$ , соответствующей координате X, и получается в результате суммирования спектральной плотности мощности  $PSD(v_k, u_q)$  (пункт <u>2.1.9.1</u>) по пространственной частоте  $u_q$ , соответствующей координате Y, и умножения полученной суммы на приращение частоты  $\Delta u_q$ .

Функция спектральной плотности мощности *PSD-X* определяется соотношением:

$$PSD-X(v_k) = \sum_{q=0}^{N_y-1} PSD(v_k, u_q) \cdot \Delta u_q = \frac{\sum_{q=0}^{N_y-1} PS(v_k, u_q)}{\Delta v_k}$$
(10)

где:

$$\sum_{q=0}^{N_y-1} PS(v_k, u_q) = \sum_{q=0}^{N_y-1} |C(v_k, u_q)|^2 - сумма значений спектра мощности PS(v_k, u_q) в$$

интервале частот  $(v_k, v_k + \Delta v_k)$  по всем частотам  $u_q$ ;

 $C(v_k, u_q)$  – дискретное преобразование Фурье исходной функции (пункт 2.1.9.1);

 $\Delta v_{\scriptscriptstyle k}\,, \Delta u_{\scriptscriptstyle q}\,$  - приращения пространственных частот.

#### График функции PSD-X, использование одиночного и двойного маркеров

Использование маркеров аналогично случаю функции *профиля сечения* на вкладке **FFT Sections.** 

#### Вкладка PSDY

На вкладке **PSDY** (Рис. 2-89) отображается одномерная функция спектральной плотности мощности **PSD-Y** 



Рис. 2-89. Вкладка PSDY – отображение функции спектральной плотности мощности PSD-Y

#### Определение функции PSD-Y

Функция спектральной плотности мощности *PSD-Y* является функцией только одной пространственной частоты  $u_a$ , соответствующей координате Y и получается в

результате суммирования спектральной плотности мощности  $PSD(v_k, u_q)$  (пункт <u>2.1.9.1</u>) по пространственной частоте  $v_k$ , соответствующей координате X, и умножения полученной суммы на приращение частоты  $\Delta v_k$ .

Функция спектральной плотности мощности **PSD-Y** определяется соотношением (11):

$$PSD-Y(u_q) = \sum_{k=0}^{N_x - 1} PSD(v_k, u_q) \cdot \Delta v_k = \frac{\sum_{k=0}^{N_x - 1} PS(v_k, u_q)}{\Delta u_q}$$
(11)

где:

 $\sum_{k=0}^{N_x-1} PS(v_k, u_q) = \sum_{k=0}^{N_x-1} |C(v_k, u_q)|^2 - сумма значений спектра мощности <math>PS(v_k, u_q)$  в

интервале частот ( $u_q$ ,  $u_q + \Delta u_q$ ), по всем частотам  $v_k$ ;

 $C(v_k, u_q)$  – дискретное преобразование Фурье исходной функции (пункт 2.1.9.1);

 $\Delta v_{\boldsymbol{k}}$  ,  $\Delta u_{\boldsymbol{q}}$  – приращения пространственных частот.

#### График функции PSD-Y, использование маркеров

Использование маркеров аналогично случаю функции *профиля сечения* на вкладке **FFT Sections.** 

# 2.1.9.6. Правая панель - FFT Image

На правой панели данных, отображается Фурье-изображения (FFT Image). В качестве Фурье-изображения, в зависимости от значения параметра FFT Scaling, могут отображаться следующие функции: спектр модуля преобразования Фурье, спектр мощности, корень квадратный из модуля, логарифм (натуральный, десятичный) из спектра мощности.

#### Измерение пространственных частот на Фурье-изображении

Для измерения пространственной частоты (расстояния от центра до рассматриваемой точки на Фурье-изображении), соответствующей локальному максимуму на Фурье-изображении, используется инструмент для измерения длины (Рис. 2-90). Для измерения следует:

1. Нажать кнопку на панели инструментов (Рис. 2-90). При этом на Фурьеизображении появится радиус-вектор, под Фурье-изображением появится панель, в которой отображаются параметры радиус-вектора (Рис. 2-91).

ବ୍ର୍ 🖑 🌣 🛸 🥖 🗉

Рис. 2-90 Включение инструмента измерения длины

2. Захватить курсором конец радиус-вектора и переместить в нужную точку на изображении (Рис. 2-91).



Рис. 2-91. Измерение пространственной частоты на Фурье-изображении

В результате под Фурье-изображением отображаются (Рис. 2-92):

FFT Measurement on measuring line			
WaveLength = 0.281 nm			
Frequancy = 3.555 1/nm			
FnZ = 0.00705 nm			
X = 2.116 1/nm			
Y = 2.857 1/nm			
Angle = 53.480 deg.			

Рис. 2-92. Результаты измерения пространственной частоты,
соответствующей выбранной точке на Фурье-изображении

- Wave Length длина волны (величина, обратная пространственной частоте), соответствующая выбранной точке;
- Frequency пространственная частота (длина радиус-вектора), соответствующая выбранной точке;
- **FnZ** значение Фурье-функции в выбранной точке. В приведенном примере в качестве **FnZ** выбрана функция *Magnitude* (модуль преобразования Фурье).
- **X**, **Y** координаты выбранной точки в Фурье-пространстве пространственные частоты  $(v_k, u_q)$  в обозначениях, введенных в пункте 2.1.9.1.
- Angle угол ориентации радиус-вектора относительно оси Х

#### Радиальные сечения на Фурье-изображении

Для проведения сечений на Фурье-изображении используется инструмент Center Section, кнопка (Рис. 2-93). Для проведения сечения следует:

1. Нажать кнопку *П* на панели инструментов (Рис. 2-93). При этом на Фурьеизображении появится радиус-вектор, под Фурье-изображением появится панель, в которой отображаются параметры радиус-вектора (Рис. 2-95)



Рис. 2-93. Включение инструмента Center Section

2. Захватить курсором конец радиус-вектора и переместить в нужную точку на изображении.



Рис. 2-94. Проведение сечения на Фурье-изображении

Линия сечения совпадает с радиус-вектором исходящим из центра Фурьеизображения. Профиль линии сечения отображается на вкладке FFT Sections. Под Фурье-изображением отображаются параметры радиус-вектора, соответствующего линии сечения (Рис. 2-95):

FFT Measurement on secant			
WaveLength = 0.0450 nm			
Frequancy = 22.204 1/nm			
FnZ = 0.00000666 nm			
X = 22.122 1/nm			
Y = -1.905 1/nm			
Angle = -4.922 deg.			

Рис. 2-95. Параметры радиус-вектора, соответствующего линии сечения

Wave Length	<ul> <li>длина волны (величина, обратная пространственной частоте), соответствующая точке, лежащей на конце линии сечения;</li> </ul>
Frequency	<ul> <li>пространственная частота (длина радиус-вектора), соответствующая точке, лежащей на конце линии сечения;</li> </ul>
FnZ	<ul> <li>– значение Фурье-функции в точке, лежащей на конце линии сечения.</li> <li>В приведенном примере в качестве FnZ выбрана функция Magnitude (модуль преобразования Фурье).</li> </ul>
Χ, Υ	— координаты точки, лежащей на конце линии сечения — пространственные частоты $(v_k, u_q)$ в обозначениях, введенных в пункте <u>2.1.9.1</u> .
Angle	<ul> <li>– угол ориентации линии сечения относительно оси Х</li> </ul>

#### 2.1.9.7. Сохранение полученных результатов

Для сохранения, полученные данные (одномерные функции спектральной плотности мощности, Фурье изображение) следует отправить в Дерево фреймов в качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом

(п. <u>1.3.4</u> Сохранение фреймов на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку Send Data на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку ОК создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки **Send Data**.

Нажатие на кнопку OK+<Ctrl>+<Alt> - создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

#### 2.1.10. FFT Filtration – Фурье фильтр

Метод FFT Filtration позволяет производить Фурье-фильтрацию исходного изображения:

- с использованием полосовой фильтрации такими фильтрами как: фильтр низких частот, фильтр высоких частот, полосовой фильтр, режекторный фильтр;
- с использованием локальной фильтрации прямоугольным фильтром.

Процедура Фурье-фильтрации содержит следующие основные шаги:

- 1. Прямое преобразование Фурье, в результате которого для исходной функции, соответствующей исходному изображению, получают Фурье-преобразование;
- 2. Фильтрация Фурье-преобразования посредством удаления определенных частотных компонент;
- 3. Обратное преобразование Фурье, в результате которого получается отфильтрованное изображение.

# 2.1.10.1. Активация метода FFT Filtration

Метод FFT Filtration активируется стандартным способом: либо через дерево методов, посредством двойного щелчка на FFT Filtration (Рис. 2-96), либо через главное меню, последовательным выбором пунктов Analysis  $\rightarrow$  Fourier  $\rightarrow$  FFT Filtration.



Рис. 2-96. Активация FFT Filtration через дерево методов

В результате открывается окно FFT Filtration.

# 2.1.10.2. Окно FFT Filtration



Рис. 2-97. Окно FFT Filtration

Окно FFT Filtration (Рис. 2-97) содержит следующие элементы:

- Левая панель 2D-данных содержит несколько вкладок. В зависимости от выбора вкладки на данной панели отображается: исходное изображение (вкладка Input), отфильтрованное изображение (вкладка Result), разница между исходным и отфильтрованным изображением (вкладка Difference);
- Правая панель 2D-данных, в которой, в зависимости от выбранной вкладки, отображается: Фурье-образ (вкладка FFT Image), отфильтрованное изображение (вкладка Result), разница между исходным и отфильтрованным изображением (вкладка Difference);
- Панель управления;
- Строка командных кнопок

# 2.1.10.3. Панель управления FFT Filtration. Режим полосовой фильтрации

Панель управления содержит две вкладки(Рис. 2-98): **Band Filter** и **Rect Filter**, которые соответствуют двум режимам фильтрации: полосовой фильтрации и локальной фильтрации прямоугольными фильтрами.

Выбор вкладки **Band Filter** включает режим полосовой фильтрации. В этом случае панель управления содержит следующие элементы управления (Рис. 2-98):

Band Filter Rect Filter		
K} ☐ LowPass ④ HighPass ① BandPass ① BandReject	FFT Scaling Magnitude TypeOfSubtract 2 Order	Low Frq Long Wi 8,77 1/m 0,1141 mm High Frq Short Wi 8,77 1/m 0,1141 mm Show Mask Calc
		Reset Ok Cancel Help

Рис. 2-98. Панель управления FFT Filtration в режиме полосовой фильтрации

#### Filtration – выбор полосового фильтра

Можно выбрать один из четырех фильтров (Рис. 2-99):



Рис. 2-99. Выбор фильтра

- Low Pass фильтр низких частот. Пропускает низкочастотные компоненты Фурье спектра, лежащие ниже частоты среза (Low Freq), и обрезает высокочастотные компоненты;
- High Pass фильтр высоких частот. Пропускает высокочастотные компоненты Фурье спектра, лежащие выше частоты среза (High Freq), и обрезает низкочастотные компоненты;
- Band Pass полосовой фильтр, имеющий две частоты среза: нижнюю (Low Freq) и верхнюю (High Freq). Band Pass фильтр обрезает компоненты Фурье спектра, частоты которых меньше нижней частоты среза (Low Freq) и больше верхней частоты среза (High Freq), оставляя без изменения компоненты Фурье спектра в полосе между частотами Low Freq и High Freq.
- Band Reject режекторный фильтр, является полосовым фильтром, имеющим две частоты среза, нижнюю частоту (Low Freq) и верхнюю (High Freq). Band Reject фильтр вырезает компоненты Фурье спектра в

полосе между нижней частотой (Low Freq) и верхней частотой (High Freq), оставляя без изменения компоненты, частоты которых меньше нижней частоты среза (Low Freq) и больше верхней частоты среза (High Freq).

#### Low Freq, Long WL – частота среза Low Pass фильтра

Параметр Low Freq (Рис. 2-100) задает частоту среза Low Pass фильтра (нижнюю частоту среза Band Pass фильтра и Band Reject фильтра).



Рис. 2-100. Параметры Low Freq, Long WI

Параметр Long WL (Рис. 2-100) является величиной, обратной величине Low Freq:

#### Long WL=1/ Low Freq

Частоту среза Low Pass фильтра (нижнюю частоту среза Band Pass фильтра и Band Reject фильтра) можно менять посредством изменения значения параметра Low Freq, либо параметра Long WL

#### High Freq, Short WL – частота среза High Pass фильтра

Параметр **High Freq** (Рис. 2-100) задает частоту среза **High Pass** фильтра (верхнюю частоту **Band Pass** фильтра и **Band Reject** фильтра).



Рис. 2-101. Параметры Low Freq, Long WL

Параметр Short WL (Рис. 2-101) является величиной, обратной величине High Freq:

#### Short WL=1/ High Freq

Частоту среза High Pass фильтра (верхнюю частоту Band Pass фильтра и Band Reject фильтра) можно менять, посредством изменения значения параметра High Freq, либо параметра Short WL

#### Параметр FFT Scaling

Параметр **FFT Scaling** определяет, какая функция отображается в качестве Фурьеизображения: спектр модуля преобразования Фурье, спектр мощности, корень квадратный из модуля, логарифм (натуральный, десятичный) из спектра мощности.

Значения параметра **FFT Scaling** (Рис. 2-102) и соответствующие этим значениям функции, отображаемые в качестве Фурье-изображения, приведены в Табл. 2-7 (более подробное описание функций приведено в Табл. 2-6 из пункта <u>2.1.9.4</u>).



Рис. 2-102. Возможные значения параметра FFT Scaling

Табл. 2-7. Значения параметра **FFT Scaling** и соответствующие этим значениям функции, отображаемые в качестве Фурье-изображения.

Значение параметра	Функция, отображаемая в качестве Фурье-изображения		
FFT Scaling			
Power Spectrum	спектр мощности		
Magnitude	спектр модуля преобразования Фурье		
Sqrt Magnitude	корень квадратный из спектра модуля преобразования Фурье		
Logarithmic	натуральный логарифм спектра мощности		
Decibel	десятичный логарифм относительного спектра мощности		

#### **Type Of Subtract**

Параметр Туре Of Subtract имеет значения (Рис. 2-103):

- **None** преобразование Фурье производится над исходной функцией, без предварительной обработки;
- Average перед преобразованием Фурье над исходной функцией производится предварительная обработка вычитание среднего значения;
- **Plane** перед преобразованием Фурье над исходной функцией производится предварительная обработка вычитание плоскости;
- **2 Order** перед преобразованием Фурье над исходной функцией производится предварительная обработка вычитание поверхности второго порядка;
- **3 Order** перед преобразованием Фурье над исходной функцией производится предварительная обработка вычитание поверхности третьего порядка.

TypeOfSubtract			
None	R		
None	1		
Average			
Plane			
2 Order			
3 Order			

Рис. 2-103. Значения параметра Subtract

#### Флажок Show Mask

Флажок Show Mask (Рис. 2-104) включает/выключает отображение на Фурьеизображении маски используемого полосового фильтра – окружностей, имеющих радиусы, равные частотам среза фильтра.

Show Mask	Calc		
N			

Рис. 2-104. Флажок Show Mask

#### <u>Кнопка Calc</u>

Кнопка **Calc** (Рис. 2-105) позволяет запускать процедуру Фурье-фильтрации, в результате которой удаляются выделенные частотные компоненты и рассчитывается обратное преобразование Фурье.

Show Mask	Calc
-----------	------

Рис. 2-105. Кнопка Calc – запуск процедуры расчета обратного FFT

# 2.1.10.4. Панель управления FFT Filtration. Режим локальной фильтрации прямоугольным фильтром

Выбор закладки **Rect Filter** включает режим локальной фильтрации прямоугольным фильтром. В этом случае панель управления содержит элементы управления, показанные на Рис. 2-106.

Band Filter Rect Filte	er   R			
	Filtration	Magnitude		
	C OutRect	TypeOfSubtract		
				Calc
			Reset Ok	Cancel Help

Рис. 2-106. Панель управления **FFT Filtration** в режиме локальной фильтрации прямоугольным фильтром

#### Filtration – выбор вырезаемой области

При локальной фильтрации по прямоугольным областям можно выбрать один из двух вариантов вырезания частот (Рис. 2-107):



Рис. 2-107. Выбор вырезаемой области

InRect – в этом случае вырезаются частоты, лежащие внутри выделенных прямоугольных областей;

**OutRect** – в этом случае вырезаются частоты, лежащие вне выделенных прямоугольных областей.

Остальные элементы управления описаны в предыдущем пункте <u>2.1.10.3</u> «Панель управления FFT Filtration. Режим полосовой фильтрации» на стр. <u>140</u>.

# 2.1.10.5. PaGoma FFT Filtration

#### Исходное состояние при запуске модуля FFT Filtration

По умолчанию при открытии окна **FFT Filtration** (Рис. 2-108), устанавливаются следующие настройки:

- на левой панели открывается вкладка Input Image с изображением исходной 2D функции;
- на правой панели открывается вкладка FFT Image с Фурье- изображением, соответствующим функции спектра мощности (Power Spectrum);
- на панели управления открывается вкладка **Band Filter** со следующими параметрами настройки:
  - FFT Scaling= Power Spectrum,
  - Type Of Subtract = None;
  - установлен фильтр Low Pass фильтр низких частот
  - флажок Show Mask сброшен.


Рис. 2-108. Окно FFT Filtration в начальный момент работы

#### Работа в режиме полосовой фильтрации

Для отображения на Фурье-изображении маски фильтра (частот среза) следует установить флажок Show Mask (Рис. 2-109).



Рис. 2-109. Включение отображения маски фильтра

Далее, можно изменить параметры настройки, выбрать нужный фильтр, установить необходимые параметры фильтра (значения частот среза), после чего запустить процедуру фильтрации кнопкой Calc (Рис. 2-105).

Для наблюдения результата фильтрации на левой панели следует выбрать вкладку **Result** (Рис. 2-110).



Рис. 2-110. Левая панель – вкладка Result, отображается отфильтрованное изображение; правая панель – вкладка FFT Image, отображается Фурье-изображение, с вырезанными низкими частотами

Выбирая нужные вкладки на левой и правой панелях, можно обеспечить отображение двух изображений в любых комбинациях:

- Input Image (исходное изображение) FFT Image (Фурье-изображение), Рис. 2-108, Рис. 2-109;
- **Result (**отфильтрованное изображение) **FFT Image** (Фурье-изображение), Рис. 2-110;
- Input Image (исходное изображение) Result (отфильтрованное изображение), Рис. 2-111;
- Result (отфильтрованное изображение) Difference (разность между исходным и отфильтрованным изображениями) (Рис. 2-112),
- Difference (разность между исходным и отфильтрованным изображениями) FFT Image (Фурье-изображение).



Рис. 2-111. Исходное (слева) и отфильтрованное (справа) изображения



Рис. 2-112. Отфильтрованное изображение (слева) и разность между исходным и отфильтрованным изображениями (справа)

#### Использование фильтра низких частот (Low Pass фильтра)

Фильтр низких частот (Low Pass фильтр) пропускает низкочастотные компоненты Фурье спектра, лежащие ниже частоты среза (Low Freq) и удаляет высокочастотные компоненты Фурье-спектра, лежащие выше частоты среза Low Freq. Это соответствует тому, что на Фурье-изображении удаляется область лежащая вне круга, радиус которого равен частоте среза Low Freq. Удаление высокочастотных компонент Фурье-спектра эквивалентно вычитанию из исходного изображения периодических составляющих с малым периодом (малой длиной волны). Ниже приведен пример применения Low Pass фильтра.

На Рис. 2-113, слева приведено исходное изображение, справа – Фурье-изображение (спектр мощности). На Фурье-изображение наложена маска Low Pass фильтра – окружность, имеющая радиус, равный значению частоты среза Low Freq. Параметры фильтра приведены на Рис. 2-114.



Рис. 2-113. Слева – исходное изображение, справа – увеличенное Фурье-изображение (спектр мощности) с маской Low Pass фильтра



Рис. 2-114. Параметры применяемого Low Pass фильтра

Результаты применения **Low Pass** фильтра с частотой среза **Low Freq= 9.08 нм<sup>-1</sup>** показаны на Рис. 2-115, Рис. 2-116, Рис. 2-117.

На Рис. 2-115 слева приведено отфильтрованное изображение, справа – Фурьеизображение с вырезанными высокими частотами (частота среза Low Freq= 9.08 нм<sup>-1</sup>).



Рис. 2-115. Применения **Low Pass** фильтра. Слева – отфильтрованное изображение, справа увеличенное Фурье-изображение с вырезанными высокими частотами и маской Low Pass фильтра



На Рис. 2-116 слева приведено исходное изображение, справа – отфильтрованное, частота среза Low Freq= 9.08 нм<sup>-1</sup>.

Рис. 2-116. Применения Low Pass фильтра. Слева – исходное изображение, справа – отфильтрованное изображение после применения Low Pass фильтра (Low Freq=9.08 нм<sup>-1</sup>)

На Рис. 2-117 слева приведено исходное изображение, справа – разность между исходным изображением и отфильтрованным изображением (вычитаемое изображение).



Рис. 2-117. Применения Low Pass фильтра. Слева – исходное изображение, справа – разность между исходным и отфильтрованным изображением

#### Использование фильтра высоких частот (High Pass фильтра)

Фильтр высоких частот (High Pass фильтр) пропускает высокочастотные компоненты Фурье спектра, лежащие выше частоты среза (High Freq) и удаляет низкочастотные компоненты Фурье-спектра, лежащие ниже частоты среза High Freq. Это соответствует тому, что на Фурье-изображении удаляется область лежащая внутри круга, радиус которого равен частоте среза High Freq. Удаление низкочастотных компонент Фурье-спектра эквивалентно вычитанию из исходного изображения периодических составляющих с большим периодом (большой длиной волны). Ниже приведен пример применения High Pass фильтра.

На Рис. 2-118, слева приведено исходное изображение, справа – Фурье-изображение (спектр модуля преобразования Фурье). На Фурье-изображение наложена маска **High Pass** фильтра – окружность, имеющая радиус, равный значению частоты среза **High Freq**, параметры фильтра приведены на Рис. 2-119.



Рис. 2-118. Слева - исходное изображение, справа увеличенное Фурье-изображение (Спектр модуля преобразования Фурье) с маской High Pass фильтра

Filtration	FFT Scaling		
C LowPass	Magnitude	0,25	1/µm 4,0000
HighPass			ψ
C BandPass	TypeOfSubtract	High Frq	Short WI
C BandReject	Average 💌	0,25	1/µm 4,0000 1 µm
			1

Рис. 2-119. Параметры применяемого High Pass фильтра

Результат применения **High Pass** фильтра показан на Рис. 2-121, Рис. 2-121, Рис. 2-122.

На Рис. 2-120 слева приведено отфильтрованное изображение, справа – Фурьеизображение с вырезанными низкими частотами (частота среза **High Freq= 0.25 мкм<sup>-1</sup>**).



Рис. 2-120. Применения **High Pass** фильтра. Слева – отфильтрованное изображение, справа увеличенное Фурье-изображение с вырезанными низкими частотами и маской High Pass фильтра

На Рис. 2-121 слева приведено исходное изображение, справа – отфильтрованное, частота среза **High Freq=0.25** мкм<sup>-1</sup>.



Рис. 2-121. Применения **High Pass** фильтра. Слева – исходное изображение, справа – отфильтрованное изображение после применения High Pass фильтра (High Freq**=0.25 мкм<sup>-1</sup>)** 

На Рис. 2-122 слева приведено исходное изображение, справа – разность между исходным изображением и отфильтрованным изображением (вычитаемое изображение).



Рис. 2-122. Применения **High Pass** фильтра. Слева – исходное изображение, справа – разность между исходным и отфильтрованным изображением

#### Использование полосового фильтра Band Pass

Полосовой фильтр **Band Pass** вырезает компоненты Фурье спектра, частота которых меньше нижней частоты среза (Low Freq) и больше верхней частоты среза (High Freq), оставляя без изменения компоненты Фурье спектра в полосе между частотами Low Freq и High Freq. В результате на Фурье-изображении удаляются области лежащие внутри круга, радиус которого равен нижней частоте среза Low Freq и вне круга, радиус которого равен верхней частоте среза High Freq. Ниже приведен пример применения Band Pass фильтра.

На Рис. 2-123 слева приведено исходное изображение, справа – Фурье-изображение (спектр модуля преобразования Фурье). На Фурье-изображение наложена маска **Band Pass** фильтра: окружность малого радиуса, равного частоте среза **Low Freq**, и окружность большого радиуса, равного частоте среза **High Freq**, параметры фильтра приведены на Рис. 2-124.



Рис. 2-123. Слева - исходное изображение, справа – увеличенное Фурье-изображение (спектр модуля преобразования Фурье) с маской Band Pass фильтра



Рис. 2-124. Параметры применяемого Band Pass фильтра

Результат применения **Band Pass** фильтра показан на Рис. 2-125: слева – исходное изображение, справа – отфильтрованное.



Рис. 2-125. Применение **Band Pass** фильтра. Слева – исходное изображение, справа – отфильтрованное изображение после применения Band Pass фильтра

На Рис. 2-126 слева показано исходное изображение, справа – разность между исходным и отфильтрованным изображением.



Рис. 2-126. Применение Band Pass фильтра. Слева – исходное изображение, справа – разность между исходным и отфильтрованным изображением

#### Работа в режиме локальной фильтрации прямоугольными фильтрами

Выбор вкладки **Rect Filter** включает режим локальной фильтрации прямоугольными фильтрами.

Для локальной фильтрации прямоугольными фильтрами следует выполнить следующие действия:

1. Активировать инструмент Select Region, нажав кнопку 🖾 на панели инструментов (Рис. 2-127).



Рис. 2-127. Активация инструмента Select Region

2. Выделить при помощи курсора прямоугольную область на Фурье-изображении (Рис. 2-128).



Рис. 2-128. Выделение прямоугольной области на Фурье-изображении. Параметры выделенной области отображаются под Фурье-изображением

Для выделения области следует поместить курсор в нужную точку на Фурьеизображении, нажать левую кнопку мыши и, не отпуская кнопку, переместить курсор. Фиксация выделенной области происходит при отпускании кнопки мыши. Выделение второй и последующих областей производится аналогично первой, но с нажатой клавишей <Ctrl>. Любую выделенную область можно изменять и перемещать при помощи курсора.



Запустить процедуру фильтрации кнопкой \_\_\_\_\_.

Рис. 2-129. Результат применения локальных прямоугольных фильтров

На Рис. 2-129 показан результат применения локальной фильтрации: слева – отфильтрованное изображение, справа – Фурье-изображение с удаленными областями. Параметры выделенных областей отображаются под Фурье-изображением (Рис. 2-130).

Rect Coardinates InX[1] = -14.500 1/nm; InY[1] = 2.000 1/nm; FnX[1] = -10.000 1/nm; FnY[1] = 11.500 1/nm; InX[2] = -10.500 1/nm; InY[2] = 20.500 1/nm; FnX[2] = -3.500 1/nm; FnY[2] = 31.000 1/nm; InX[3] = -2.500 1/nm; InY[3] = 7.500 1/nm; FnX[3] = 1.500 1/nm; FnY[3] = 31.500 1/nm; InX[4] = 2.500 1/nm; InY[4] = 20.500 1/nm; FnX[4] = 6.500 1/nm; FnY[4] = 31.500 1/nm;

Рис. 2-130. Параметры выделенных областей

#### 2.1.10.6. Сохранение полученных результатов

Для сохранения, полученные 2D данные (отфильтрованное изображение, разность между исходным и отфильтрованным изображениями, Фурье-изображение) следует отправить в Дерево фреймов в качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (п. <u>1.3.4</u> Сохранение фреймов на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку **Send Data** на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку **ОК** создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки **Send Data**.

Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl>+<Alt> - создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

# 2.1.11. Subtract Surface – вычитание поверхности заданного порядка

Метод Subtract Surface является методом преобразования поверхности. Subtract Surface предназначен для «выравнивания» («планаризации») поверхности, в частности, для устранения наклона и искажений более высокого порядка.

Subtract Surface позволяет вычитать из исходного 2D-изображения:

- поверхность нулевого порядка (среднее значение):

**Z** = average;

- поверхность первого порядка (плоскость):

 $\mathbf{Z} = \mathbf{a}\mathbf{x} + \mathbf{b}\mathbf{x} + \mathbf{c};$ 

- поверхность второго порядка:

 $\mathbf{Z} = \mathbf{a}\mathbf{x}^2 + \mathbf{b}\mathbf{x}^2 + \mathbf{c}\mathbf{x}\mathbf{y} + \mathbf{d}\mathbf{x} + \mathbf{e}\mathbf{y} + \mathbf{f};$ 

- поверхность третьего порядка:

$$Z = ax^{3} + bx^{3} + cx^{2}y + dxy^{2} + ex^{2} + fy^{2} + jxy + hx + gy + k$$

Вычитаемая поверхность определяется, как аппроксимирующая поверхность, имеющая минимальное среднеквадратичное отклонение от исходной функции.

Расчет параметров вычитаемой поверхности может производиться, в зависимости от выбора пользователя:

- по всей области (в плоскости XY) исходного изображения;
- по суммарной, выделенной в плоскости ХҮ, области исходного изображения;
- по невыделенной области исходного изображения.

Если на исходном изображении нет выделенных областей, то параметры вычитаемой поверхности определяются по всей области исходного изображения.

Если на исходном изображении имеются выделенные области, то параметры вычитаемой поверхности определяются либо по суммарной выделенной области (параметр Selected Areas = Include), либо по невыделенной области (параметр Selected Areas = Exclude).

# 2.1.11.1. Активация Subtract Surface

Subtract Surface активируется стандартным способом: либо через дерево методов, посредством двойного щелчка на Subtract Surface (Рис. 2-131) либо через главное меню, последовательным выбором пунктов Analysis  $\rightarrow$  Flatten Correction 2D  $\rightarrow$  Subtract Surface.



Рис. 2-131. Активация Subtract Surface через дерево методов

В результате открывается окно Subtract Surface.

# 2.1.11.2. Окно Subtract Surface



Рис. 2-132. Окно Subtract Surface

Окно Subtract Surface (Рис. 2-132) содержит следующие элементы:

- Панель исходных 2D-данных, в которой отображается исходное изображение;
- Панель выходных 2D-данных, в которой отображается результирующее изображение, полученное в результате вычитания из исходного изображения поверхности заданного порядка;
- Панель управления.

При открытии окна, по умолчанию, на исходном изображении нет выделенных областей, и параметры вычитаемой поверхности определяются по всей области исходного изображения.

# 2.1.11.3. Панель управления Subtract Surface

Order	Plane	<b>-</b>	Apply
Selected Areas	Include	<b>-</b>	Reset

Рис. 2-133. Панель управления Subtract Surface

Панель управления **Subtract Surface** (Рис. 2-133) содержит следующие элементы управления:

Order, Selected Areas,

Apply,

Reset.

Параметр **Order** задает порядок вычитаемой поверхности и может принимать следующие значения (Рис. 2-134):

- Average вычитается среднее значение (поверхность нулевого порядка);
- Plane вычитается поверхность первого порядка (плоскость);
- 20rder вычитается поверхность второго порядка;
- 30rder вычитается поверхность третьего порядка.



Рис. 2-134. Значения параметра Order

Параметр **Selected Areas** определяет, по какой области рассчитываются параметры вычитаемой поверхности, если на исходном изображении имеются выделенные области.

Параметр Selected Areas имеет два значения (Рис. 2-135):

- Include в этом случае вычитаемая поверхность определяется по выделенной области;
- **Exclude** в этом случае вычитаемая поверхность определяется по невыделенной области.

Selected Areas	Include 💌	[
	Include Exclude	

Рис. 2-135. Значения параметра Selected Areas

# 2.1.11.4. Paбoma Subtract Surface

Если на исходном изображении нет выделенных областей, то параметры вычитаемой поверхности определяются по всей области исходного изображения.

Если на исходном изображении имеются выделенные области, то параметры вычитаемой поверхности определяются либо по суммарной выделенной области, либо по невыделенной области, в зависимости от значения параметра Selected Areas на панели управления.

#### Работа без выделенных областей

При открытии окна, в начальный момент, параметры вычитаемой поверхности определяются по всей области исходного изображения, поскольку, по умолчанию, на исходном изображении нет выделенных областей.

Соответственно, на панели выходных 2D-данных, отображается изображение, получаемое в результате вычитания из исходного изображения поверхности, параметры которой рассчитаны по всей области изображения. При этом порядок вычитаемой поверхности соответствует значению параметра **Order**, которое осталось после последнего применения метода **Subtract Surface** (Рис. 2-136).

Если изменять значение параметра **Order**, то в интерактивном режиме будет изменяться выходное изображение, поскольку изменятся параметры вычитаемой поверхности.



Рис. 2-136. Применение метода Subtract Surface к относительно однородной поверхности. Слева – исходная поверхность, справа - результат вычитания плоскости. Вычитаемая поверхность рассчитывается по всей области исходной функции

Если исходная поверхность является относительно однородной (не имеет локальных особенностей значительных размеров: выступов, бугров, впадин), можно ограничиться вычитанием поверхности, рассчитанной по всей области исходной функции. Пример такого типа исходной поверхности приведен на Рис. 2-136.

#### Работа Subtract Surface с выделенными областями на исходном изображении

Работа **Subtract Surface** с выделенными областями используется в случае, если исходная поверхность является неоднородной поверхностью, которая имеет как относительно плоские участки, так и локальные неоднородности значительных размеров.

Переход в режим работы с выделенными областями происходит автоматически, как только пользователь выделит на изображении какую-либо область. При этом вычитаемая поверхность будет рассчитываться по выделенной области (при значении параметра Selected Areas =Include), либо исключая выделенную область (при значении параметра Selected Areas =Exclude).

Процедура выделения областей и работа с ними описаны в п. <u>2.1.4.8</u> Roughness Analysis для выделенных областей на стр. <u>85</u>.

#### <u>Пример. Неоднородная поверхность, имеющая плоские участки,</u> лежащие в одной плоскости.

Если исходная поверхность имеет:

- общий наклон,
- сравнительно плоские участки, которые лежат примерно в одной плоскости,
- локальные неоднородности значительных размеров (Рис. 2-137),

Тогда можно выделить плоские участки и вычесть поверхность, рассчитанную по выделенной области. Либо выделить неоднородные участки и вычесть поверхность, рассчитанную по невыделенной области.



Рис. 2-137. Слева - исходная поверхность, имеющая локальную неоднородность в центральной части и плоские участки по краям.

Справа – результат вычитания поверхности, рассчитанной по выделенным областям

На Рис. 2-137 слева показано исходное изображение - поверхность с общим наклоном, имеющая локальную неоднородность в центральной части и сравнительно плоские участки, лежащие примерно в одной плоскости, по краям. На исходном изображении выделены плоские участки по краям изображения. Справа – результат вычитания плоскости, рассчитанной по выделенным областям (параметр Order=Plane, параметр Selected Areas=Include).

#### <u>Пример. Неоднородная поверхность, имеющая плоские ступенчатые</u> <u>террасы:</u>

Рассмотрим в качестве исходной поверхности - поверхность графита.

Исходная поверхность состоит из плоских, ступенчатых террас и имеет некоторый общий наклон. Это хорошо видно, если перед тем как использовать **Subtract Surface**, применить к исходному изображению метод **Section Analysis** и посмотреть профиль для сечений в различных направлениях (Рис. 2-138).



Рис. 2-138. Применение метода Section Analysis для выявления наклона исходной поверхности

В результате применения к исходному изображению метода **Subtract Surface** без выделения областей, получается результирующее изображение, на котором террасы имеют некоторый наклон (Рис. 2-139).



Рис. 2-139. Subtract Surface без выделения областей на неоднородной поверхности.

Можно выделить область, лежащую на самой большой террасе (Рис. 2-140, левая часть). В результате, вычитается поверхность (в нашем примере плоскость), рассчитанная по этой области, и получается результирующее изображение, на котором террасы приблизительно параллельны горизонтальной плоскости (Рис. 2-140, правая часть).



Рис. 2-140. Subtract Surface по выделенным областям. Слева – исходное изображение, с выделенной областью, справа результирующее изображение.

# 2.1.11.5. Сохранение полученных результатов

Для сохранения, полученные данные (преобразованное изображение) следует отправить в Дерево фреймов в качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (п. <u>1.3.4</u> Сохранение фреймов на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку **Send Data** на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку **OK** создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки **Send Data**.
- Нажатие на кнопку OK+<Ctrl>+<Alt> создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

# 2.1.12. Three Points Leveling – вычитание плоскости, проходящей через три заданные точки

Метод Three Points Leveling является методов преобразования поверхности. Метод Three Points Leveling предназначен для «выравнивания» («планаризации») поверхности, в частности, для устранения наклона.

Three Points Leveling вычитает из исходного изображения плоскость, проходящую через три точки, выделенные на изображении.

# 2.1.12.1. Активация Subtract Surface

Three Points Leveling активируется стандартным способом: либо через дерево методов, посредством двойного щелчка на Three Points Leveling (Puc. 2-141) либо через главное меню, последовательным выбором пунктов Analysis  $\rightarrow$  Flatten Correction 2D  $\rightarrow$  Three Points Leveling.



Рис. 2-141. Активация Three Points Leveling через дерево методов

В результате открывается окно Three Points Leveling.

@Height [sample242-2.mdt] - Three Points Leveling		<u>_   ×</u>
3 Points Leveling This module subtracte plane from Image. Plane formed b	y three selected Areas.	
ବ୍ର୍ 🖑 🗆 📝 🌣 🔦	୧୧୯୬ ଢାଟ	
₩ B (0,98, 4,00, 235)		
4. 3.5 9. 300		20
C (4, 13, 2, 41, 108)	5	15 11
150 20 150 20 150 20	ري در	10
01 + <sup>A</sup> (0,80, 0,90, 334) 1 S	0,5 1,0 1	
ο 0 0,5 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0 3,5 4,0 μm	ο 0 0,5 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0 3,5 4,0 μm	
Take Height from  Center  Apply    Reset		
	Ok Cancel	Help

# 2.1.12.2. Окно Three Points Leveling

Рис. 2-142. Окно Three Points Leveling

Окно Three Points Leveling (Рис. 2-142) содержит следующие элементы:

- Панель исходных 2D-данных, в которой отображается исходное изображение;
- Панель выходных 2D-данных, в которой отображается результирующее изображение, полученное вычитанием из исходной поверхности плоскости, проходящей через три заданные точки;
- Панель управления.

#### Панель управления Three Points Leveling

Take Height from	Center	•	Apply		
			Reset		

Рис. 2-143. Панель управления Three Points Leveling

Панель управления **Three Points Leveling** (Рис. 2-143) содержит следующие элементы управления:

- Список Take Height from;
- Кнопка **Арр**у;
- Кнопка Reset.

Параметр **Take Height from** имеет два значения:

- Average в этом случае для каждой из трех опорных точек, по которым определяется вычитаемая плоскость, Z- координата определяется как среднее значение по Z для соответствующей выделенной области, а координаты X, Y – как координаты центральных точек выделенной области.
- Center в этом случае координаты для каждой из трех опорных точек, по которым определяется вычитаемая плоскость, определяются координатами трех выделенных точек.



Рис. 2-144. Three Points Leveling. Значения параметра Take Height from

# 2.1.12.3. Padoma Three Points Leveling

Если параметр **Take Height from** имеет значение **Center**, тогда, в начальный момент, при открытии окна **Three Points Leveling** на исходном изображении имеются три выделенных точки (Рис. 2-145, левая часть). Эти точки являются базисными для определения параметров вычитаемой плоскости. На панели выходных 2D-данных отображается изображение, полученное в результате вычитания плоскости из исходного изображения (Рис. 2-145, правая часть).



Рис. 2-145. Начальный момент работы **Three Points Leveling**. Слева исходное изображение с тремя выделенными точками. Справа – изображение, полученное после вычитания плоскости. Далее пользователь может изменять положение базисных точек, перемещая их в нужное место. Операции с выделенными точками (перемещение, настройки параметров) аналогичны операциям с инструментом **Point**, которые детально описаны в п. <u>1.6.1</u> на стр. <u>28</u>. Соответственно, при изменении базисных точек будут изменяться параметры вычитаемой плоскости, и, как следствие, результирующее изображение (Рис. 2-146).



Рис. 2-146. Результат, полученный после изменения положения базисных точек

Если параметр **Take Height from** имеет значение **Average**, тогда, при открытии окна **Three Points Leveling** в начальный момент, на исходном изображении имеются три выделенных области (Рис. 2-145, левая часть). Х,Ү - координаты центральных точек этих областей являются Х,Ү - координатами базисных точек, по которым определяются параметры вычитаемой плоскости. Z – координаты базисных точек определяются как средние значения по Z для соответствующих областей.



Рис. 2-147. Начальный момент работы **Three Points Leveling** в случае, когда параметр **Take Height from** имеет значение Average

Аналогично первому случаю (**Take Height from=Center**), посредством изменения размеров и положения выделенных областей, можно изменять параметры базисных точек.

#### 2.1.12.4. Сохранение полученных результатов

Для сохранения, полученные данные (преобразованное изображение) следует отправить в Дерево фреймов в качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (п. <u>1.3.4</u> Сохранение фреймов на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку **Send Data** на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку **ОК** создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки **Send Data**.
- Нажатие на кнопку OK+<Ctrl>+<Alt> создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

# 2.1.13. Fit Lines – построчное вычитание полинома заданного порядка

Метод Fit Lines является одним из методов преобразования исходной поверхности. Fit Lines может использоваться для устранения наклона изображения, а также искажений более высоких порядков. Метод основан на построчной обработке исходного изображения.

Fit Lines последовательно вычитает полином заданного порядка из каждой горизонтальной (или вертикальной) строки исходного изображения. Вычитаемый полином определяется для каждой строки, как аппроксимирующий полином, имеющий наименьшее среднеквадратичное отклонение от точек поверхности, принадлежащих рассматриваемой строке.

Порядок полинома можно устанавливать в интервале от 1 до 10, по выбору пользователя. Построчное вычитание можно устанавливать либо в направлении оси X, либо в направлении оси Y.

## 2.1.13.1. Активация Fit Lines

Fit Lines активируется стандартным способом: либо через дерево методов, посредством двойного щелчка на Fit Lines (Рис. 2-148) либо через главное меню, последовательным выбором пунктов Analysis  $\rightarrow$  Flatten Correction 1D  $\rightarrow$  Fit Lines.

🚊 Editing
🚊 - Flatten Correction 1D
Fit Lines by Area
Fit Lines

Рис. 2-148. Активация Fit Lines через дерево методов

В результате открывается окно Fit Lines.

## 2.1.13.2. Окно Fit Lines



Рис. 2-149. Окно Fit Lines

Окно Fit Lines (Рис. 2-149) содержит следующие элементы:

- Панель исходных 2D-данных, в которой отображается исходное изображение;
- Панель выходных 2D-данных, в которой отображается результирующее изображение, полученное в результате построчного вычитания полинома заданного порядка;
- Панель управления.

#### Панель управления Fit Lines

Панель управления **Fit Lines** (Рис. 2-149) содержит следующие элементы управления:

Order

Fit Line

Apply

Reset

Параметр Order устанавливает порядок вычитаемого полинома:

- **1** − 1-й порядок: *z*=*ax*+*b*;
- **2** 2-й порядок:  $z = ax^2 + bx + c$ ;
- **3**-3-й порядок: z=ax<sup>3</sup>+bx<sup>2</sup>+cx+d;
- **4** 4-йпорядок: z=ax<sup>4</sup>+bx<sup>3</sup>+cx<sup>2</sup>+dx+e;
- .....
- и так далее до 10-го порядка.

Параметр *Fit Line* задает направление строк:

Х – по оси Х,

Ү – по оси Ү.

Параметр *Offset* имеет два значения:

- Include полином вычитается полностью, вместе с константой, входящей в полином,
- **Exclude** при вычитании полинома константа, входящая в полином не вычитается.

# 2.1.13.3. Paбoma Fit Lines

При открытии окна, по умолчанию, производится построчное вычитание из каждой строки аппроксимирующего полинома при параметрах (порядок полинома - Order, и направление строк - Fit Line), которые были установлены ранее при последнем использовании Fit Lines.

На примере, приведенном на Рис. 2-149, параметры имеют следующие значения:

**Order** = 1 – вычитается полином первого порядка;

Fit Line= X – вычитание производится по строкам изображения в горизонтальном направлении (по оси X).

Далее, пользователь может изменять порядок вычитаемого полинома (параметра **Order)**, и направление строк, при этом, в интерактивном режиме будет изменяться выходное изображение.

Если выделить на изображении какую-либо область, то **Fit Lines** будет производиться только для выделенной области. Для каждого кусочка строки, принадлежащего этой выделенной области, будет рассчитываться полином, имеющий наименьшее среднеквадратичное отклонение от точек этого участка строки, и будет производиться вычитание из кривой, соответствующей этому кусочку строки, найденного полинома.

#### 2.1.13.4. Сохранение полученных результатов

Для сохранения, полученные данные (преобразованное изображение) следует отправить в Дерево фреймов в качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (п. <u>1.3.4</u> Сохранение фреймов на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку Send Data на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку **ОК** создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки **Send Data**.
- Нажатие на кнопку OK+<Ctrl>+<Alt> создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

#### 2.1.14. Fit Lines by Area – построчное вычитание полинома заданного порядка с учетом выделенных областей поверхности

Метод Fit Lines by Area является одним из методов преобразования исходной поверхности. Метод Fit Lines by Area может использоваться для устранения наклона изображения, а также искажений более высоких порядков. Метод основан на построчной обработке исходного изображения, с учетом наличия выделенных областей на изображении.

Fit Lines by Area, последовательно, вычитает полином заданного порядка из каждой горизонтальной (или вертикальной) строки исходного изображения с учетом выделенных на исходном изображении областей.

По выбору пользователя, в зависимости от значения параметра **Selected Area**, возможны два типа вычитания:

- Selected Area = Exclude - исключение выделенных областей.

В этом случае, последовательно, с каждой строкой, производятся следующие действия:

- a) определяется аппроксимирующий полином, причем, только по тем точкам строки, которые не принадлежат выделенным на изображении областям,
- б) этот полином вычитается из всей строки.
- Selected Area = Include учет выделенных областей

В этом случае, последовательно, с каждой строкой, производятся следующие действия:

- a) если строка не содержит выделенных областей, то эта строка остается без изменений,
- б) если строка содержит отрезки, принадлежащие выделенным областям, то по точкам этих выделенных отрезков определяется аппроксимирующий полином,
- в) этот полином вычитается из всей строки.

Пользователь может выбирать направление вычитания (горизонтальное – по оси X, или вертикальное – по оси Y) и порядок вычитаемого полинома (от 1 до 10).

# 2.1.14.1. Активация Fit Lines by Area

Fit Lines by Area активируется стандартным способом: либо через дерево методов, посредством двойного щелчка на Fit Lines by Area (Рис. 2-150), либо через главное меню, последовательным выбором пунктов Analysis  $\rightarrow$  Flatten Correction 1D  $\rightarrow$  Fit Lines by Area.



Рис. 2-150. Активация Fit Lines by Area через дерево методов

В результате открывается окно Fit Lines by Area.



# 2.1.14.2. Окно Fit Lines by Area

Рис. 2-151. Окно Fit Lines by Area

Окно Fit Lines by Area (Рис. 2-151) содержит:

- Панель исходных 2D-данных, в которой отображается исходное изображение;
- Панель выходных 2D-данных, в которой отображается результирующее изображение, полученное в результате построчного вычитания полинома заданного порядка с учетом выделенной области;
- Панель управления.

#### Панель управления Fit Lines by Area

Панель управления (Рис. 2-151) содержит следующие элементы управления:

- Order;
- Fit Line;
- Selected Areas;
- Offset;
- Apply;
- Reset.

Параметр Order устанавливает порядок вычитаемого полинома:

- **1**-1-й порядок: z = ax + b
- **2**-2-й порядок: z = ax2 + bx + c
- **3**-3-й порядок: z = ax3 + bx2 + cx + d
- **4** 4-й порядок: z= ax4 + bx3 + cx2 + dx + e
- .....
- и так далее до 10-го порядка.

Параметр Fit Line задает направление строк:

Х – по оси Х,

Ү – по оси Ү.

Параметр Selected Areas задает тип вычитания и имеет два значения:

- Exclude исключение выделенных областей. В этом случае, последовательно, с каждой строкой, производятся следующие действия:
  - а) определяется аппроксимирующий полином, причем, только по тем точкам строки, которые не принадлежат выделенным на изображении областям,
  - b) этот полином вычитается из всей строки.
- Include учет выделенных областей. В этом случае, последовательно, с каждой строкой, производятся следующие действия:
  - если строка не содержит выделенных областей, то эта строка остается без изменений;
  - если строка содержит отрезки, принадлежащие выделенным областям, то по точкам этих выделенных отрезков определяется аппроксимирующий полином, и далее этот полином вычитается из всей строки.

Параметр **Offse**t имеет два значения:

Include – полином вычитается полностью, вместе с константой, входящей в полином,

Exclude - при вычитании полинома константа, входящая в полином не вычитается.

## 2.1.14.3. Paбoma Fit Lines by Area

В начальный момент, при открытии окна **Fit Lines by Area** на исходном изображении имеется выделенная область, расположенная в центральной части изображения (Рис. 2-151).

По умолчанию производится построчное вычитание при параметрах, которые были установлены ранее при последнем использовании **Fit Lines by Area**, с учетом наличия на исходном изображении выделенной области.

На примере, приведенном на Рис. 2-151, параметры имеют следующие значения:

**Order** = 1 — вычитается полином первого порядка;

Fit Line= X – вычитание производится по строкам изображения в горизонтальном направлении (по оси X);

Selected Areas= Exclude - построчное вычитание с исключением выделенной области.

- Для строк, которые не пересекаются с выделенной областью, вычитаемый полином определяется по всем точкам строки.
- Для строк, которые пересекаются с выделенной областью, полином определяется только по точкам, которые не принадлежат выделенной области.

На результирующем изображении (Рис. 2-151) приведен результат вычитания при приведенных параметрах, очевидно, что он не является оптимальным.

Далее, пользователь может изменять размеры выделенной области и ее положение, а также добавить необходимое количество новых выделенных областей (операции с выделенными областями аналогичны операциям, описанным в п. <u>2.1.4.8</u>. Roughness Analysis для выделенных областей на стр. <u>85</u>).

Пользователь может также изменять порядок вычитаемого полинома (параметра **Order**), и направление строк.

#### Пример применения Fit Lines by Area, Exclude

Метод Fit Lines by Area, при значении Selected Areas= Exclude, целесообразно использовать, если в результате выделения неоднородных областей на исходном изображении, для какого-либо направления, строки, при исключении выделенных участков, содержат только однородные участки.

На Рис. 2-152, на исходном изображении, взятом из предыдущего примера, выделены области, имеющие локальные неоднородности. Тем самым, эти области исключаются при определении параметров вычитаемых полиномов. На результирующем изображении (Рис. 2-152, справа) приведен результат такого вычитания.



Рис. 2-152. Применение **Fit Lines by Area** при значении **Selected Areas=Exclude** (с исключением выделенных областей). Слева – исходное изображение, справа результирующее, после вычитания

#### Пример применения Fit Lines by Area, Include

Fit Lines by Area, при значении Selected Areas= Include (Рис. 2-153), целесообразно использовать, если для какого-либо направления, строки имеют по краям однородные участки, а неоднородные участки находятся в центральной части строк. На Рис. 2-153, на исходном изображении выделены области правой и левой части.



Рис. 2-153. Применение **Fit Lines by Area** при значении **Selected Areas=Include** (с учетом выделенных областей). Слева – исходное изображение, справа после вычитания полиномов Эти части являются достаточно однородными. Для направления вдоль оси X, начальные и конечные отрезки строк достаточно хорошо описываются линейным полиномом. При применении Fit Lines by Area (Include), для каждой строки, по этим выделенным участкам определяется аппроксимирующий полином, который затем вычитается из всей строки. Результат вычитания приведен на правой части рисунка.

#### 2.1.14.4. Сохранение полученных результатов

Для сохранения, полученные данные (преобразованное изображение) следует отправить в Дерево фреймов в качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (п. <u>1.3.4</u> Сохранение фреймов на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку **Send Data** на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку **OK** создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки **Send Data**.
- Нажатие на кнопку OK+<Ctrl>+<Alt> создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

# 2.1.15. Histogrammed Fit Lines – построчное вычитание полинома с учетом гистограммы распределения по высоте

Метод Histogrammed Fit Lines является одним из методов преобразования исходной поверхности.

**Histogrammed Fit Lines**, последовательно, из каждой горизонтальной (или вертикальной) строки исходного изображения вычитает полином заданного порядка, который рассчитывается по точкам строки, исключая точки, высота которых больше заданного верхнего уровня и меньше заданного нижнего уровня.

# 2.1.15.1. Активация Histogrammed Fit Lines

Метод Histogrammed Fit Lines активируется стандартным способом: либо через дерево методов, посредством двойного щелчка на Histogrammed Fit Lines (Рис. 2-154) либо через главное меню, последовательным выбором пунктов Analysis  $\rightarrow$  Flatten Correction 1D  $\rightarrow$  Histogrammed Fit Lines.



Рис. 2-154 Активация Histogrammed Fit Lines через дерево методов

В результате открывается окно Histogrammed Fit Lines.

#### 👰 Height [sample242-3.mdt] - Histogrammed Fit Lin N-order curve subtraction from each row or column. ର୍ତ୍ 🖑 🌣 🔮 🔍 🔍 🖑 🧔 🕵 🗖 Show mask ШШ. nm nm 8. 3,5 8 7 20 3 N 6-2,5 ន្មៈ ß 5-2,0-4-8 8 1,5-3-1,0 ദ്ദ റ്റ 0,5 n 0 50 100 150 200 ò 50 100 150 200 nm 0 nm 10<sup>3</sup>Counts -**Z Min** 0,00 Polinom order 1 5-Direction X Y Z Max 6,88 0 -----ir 1 2 ۰۰۰۰۰۰۰ 3 ۰۰۰۰۰۰ 4 ÷ Z Axis, nm ż п 6 Ok Cancel Help

# 2.1.15.2. Окно Histogrammed Fit Lines

Рис. 2-155. Окно Histogrammed Fit Lines

Окно Histogrammed Fit Lines (Рис. 2-155) содержит:

- Панель исходных 2D-данных, в которой отображается исходное изображение;
- Панель выходных 2D-данных, в которой отображается результирующее; изображение, полученное в результате построчного вычитания полинома;
- Панель управления;
- Гистограмма плотности распределения значений исходной 2D функции.

#### Панель управления Histogrammed Fit Lines

Панель управления (Рис. 2-151) содержит следующие элементы управления:

- Z Min устанавливает нижний уровень. Все точки строки, в которых значения исходной функции меньше Z Min исключаются из множества точек, по которым рассчитывается вычитаемый полином;
- Z Max устанавливает верхний уровень. Все точки строки, в которых значения исходной функции больше Z Max исключаются из множества точек, по которым рассчитывается вычитаемый полином;
- Direction задает направление строк:

Х – по оси Х,

- Ү по оси Ү
- Polinom order устанавливает порядок вычитаемого полинома:
  - **1** 1-й порядок: z = ax + b
  - **2**-2-й порядок: z = ax2 + bx + c
  - 3 3-й порядок: z = ax3 + bx2 + cx + d
  - 4 4-й порядок: z = ax4 + bx3 + cx2 + dx + e

.....

и так далее до 10-го порядка.

**Гистограмма** имеет две маркерных линии (Рис. 2-155): правая соответствует верхнему уровню **Z Max**, левая нижнему уровню **Z Min**. Посредством перемещения этих маркерных линий модно регулировать значения уровней **Z Max**, **Z Min**.

#### 2.1.15.3. Сохранение полученных результатов

Для сохранения, полученные данные (преобразованное изображение) следует отправить в Дерево фреймов в качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (п. <u>1.3.4</u> Сохранение фреймов на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку **Send Data** на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку **OK** создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки **Send Data**.
- Нажатие на кнопку OK+<Ctrl>+<Alt> создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

# 2.1.16. Fill by Superposition – замена выделенных на изображении участков суперпозицией прилегающих участков

Иногда возникает необходимость «исправить» отдельные фрагменты изображения, которые, по мнению автора изображения, являются второстепенными, и портят все изображение. При этом желательно сделать эти отдельные фрагменты примерно такими же, как и все остальное изображение.

Именно для этих целей предназначен метод Fill by Superposition, который позволяет «исправлять» отдельные фрагменты изображения, заменяя выделенные участки исходного изображения суперпозицией прилегающих участков.

# 2.1.16.1. Активация Fill By Superposition

Fill By Superposition активируется стандартным способом: либо через дерево методов, посредством двойного щелчка на Fill By Superposition (Рис. 2-156) либо через главное меню, последовательным выбором пунктов Analysis  $\rightarrow$  Editing  $\rightarrow$  Fill By Superposition.



Рис. 2-156. Активация Fill By Superposition через дерево методов

В результате открывается окно Fill By Superposition.


## 2.1.16.2. Окно Fill By Superposition



Окно Fill By Superposition (Рис. 2-157) содержит следующие элементы:

- Панель исходных 2D-данных, в которой отображается исходное изображение;
- Панель выходных 2D-данных, в которой отображается изображение, полученное в результате замены выделенных областей суперпозицией соседних областей;
- Панель управления.

#### Панель управления Fill By Superposition

Панель управления (Рис. 2-157) содержит следующие элементы управления:

Direction;

Smooth, %;

Apply;

Reset.

Параметр Direction имеет два значения:

**Vertical** – выделенный участок заменяется суперпозицией двух участков, лежащих выше и ниже выделенного и имеющих такие же размеры;

**Horizontal** – выделенный участок заменяется суперпозицией двух участков, лежащих справа и слева от выделенного и имеющих такие же размеры

Параметр **Smooth, %** задает размеры прилегающей области, по которой производится усреднение границы. Размеры прилегающей области задаются в процентах к размеру выделенной области в направлении, перпендикулярном к выбранному параметром **Direction**.

## 2.1.16.3. PaGoma Fill By Superposition

В начальный момент, при открытии окна Fill By Superposition на исходном изображении имеется выделенная область, имеющая стандартные размеры и расположение (в центральной части изображения, Рис. 2-157).

Рис. 2-157 соответствует начальному моменту работы, когда **Fill By Superposition**, применяется к стандартной выделенной области, расположенной в центральной части, и при параметрах настройки, которые были установлены при последнем использовании метода.

Далее пользователь может переместить выделенную область на объект, который желательно убрать, и/или изменить размеры выделенной области. При необходимости можно выделить дополнительные области, например, как это показано на Рис. 2-158, слева.



Рис. 2-158.Слева – исходное изображение, справа – после применения **Fill by Superposition** 

Результат применения метода к двум выделенным на исходном изображении объектам показан на Рис. 2-158, справа.

#### Принцип работы Fill by Superposition

Метод Fill by Superposition работает следующим образом. Для каждой выделенной области берутся две соседние области такого же размера, сверху и снизу, если значение параметра Direction = Vertical (либо слева и справа при значении Direction= Horizontal). Далее, для выделенной области, нижней и верхней соседних областей, последовательно, рассматриваются строки в вертикальном направлении. Значения функции Z для каждого отрезка строки выделенной области заменяется суперпозицией двух таких же отрезков строк из соседних областей. Параметры суперпозиции

выбираются таким образом, чтобы обеспечить непрерывность функции Z на линиях верхней и нижней границ выделенной области. Чтобы устранить скачек функции Z, возникающий на линиях границы, параллельных направлению строк (левой и правой границах области), для этих границ, в перпендикулярном направлении производится усреднение, степень которого определяется параметром **Smooth**. Этот параметр задает размеры прилегающей области, по которой производится усреднение. Размеры прилегающей области задаются в процентах к размеру выделенной области в направлении, перпендикулярном к выбранному параметром **Direction**.

#### 2.1.16.4. Сохранение полученного результата

Для сохранения, полученные данные (преобразованное изображение) следует отправить в Дерево фреймов в качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (п. <u>1.3.4</u> Сохранение фреймов на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку **Send Data** на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку **OK** создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки **Send Data**.
- Нажатие на кнопку OK+<Ctrl>+<Alt> создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

### 2.1.17. Fill Area

Метод Fill Area служит для редактирования областей, выделенных на 2D-изображении. Fill Area заполняет выделенные на изображении области заданным уровнем. В зависимости от выбора, значения Z координат, для всех точек, принадлежащих выделенным областям, устанавливаются равными:

- либо заданной константе,
- либо «среднему» значению.

«Среднее» значение, в зависимости от выбора, может определяться тремя способами: по выделенной области, по прилегающей области, по всему изображению.

Метод Fill Area активируется стандартным способом: либо через дерево методов, посредством двойного щелчка на Fill Area (Рис. 2-159), либо через главное меню, последовательным выбором пунктов Analysis  $\rightarrow$  Editing  $\rightarrow$  Fill Area.



Рис. 2-159 Активация Fill Area через дерево методов

В результате открывается окно Fill Area.

# 2.1.17.1. Окно Fill Area



Рис. 2-160. Окно Fill Area

Окно Fill Area (Рис. 2-160) содержит следующие элементы:

- Панель исходных 2D-данных, в которой отображается исходное изображение;
- Панель выходных 2D-данных, в которой отображается изображение, полученное в результате редактирования выделенных областей;
- Панель управления.

#### Панель управления Fill Area

Панель управления (Рис. 2-160) содержит следующие элементы управления:

- Fill Area by;
- Z Value, nm;
- Delta;
- Average from;
- Apply;
- Reset.

На панели управления отображается либо Z Value, nm, либо Delta, в зависимости от выбора значения параметра Fill Area by.

Параметр Fill Area by

Параметр Fill Area by имеет два значения (Рис. 2-161): Const и Average.

Выбор одного из них определяет режим редактирования областей, выделенных на изображении.



Рис. 2-161. Значения параметра Fill Area by

**Const** – в этом случае для всех точек выделенных областей значения Z-координат устанавливаются равными константе, которая задается параметром Z Value, nm.

Average – в этом случае для всех точек выделенных областей значения Z-координат устанавливаются равными «среднему» значению. «Среднее» значение может задаваться тремя способами, в зависимости от выбора значения параметра Average from.

#### Параметр Z Value

Параметр Z Value устанавливает значение константы, которое присваивается Zкоординатам всех точкам выделенных областей при значении параметра Fill Area by= Const

#### Параметр Delta

Параметр **Delta** устанавливает ширину полосы вокруг выделенной области. Тем самым задаются размеры области, прилегающей к выделенной области. Для этой прилегающей области определяется среднее значение координаты Z. Найденное «среднее» значение присваивается Z-координатам всех точек выделенных областей, если параметр Fill Area by = Average, а параметр Average from= Delta.

Параметр Average from

Параметр Average from имеет три значения (Рис. 2-162):



Рис. 2-162. Список значений параметра Average from

- Delta «среднее» значение рассчитывается по области, прилегающей к выделенной;
- Regions «среднее» значение рассчитывается по выделенной области,
- Entire Scan «среднее» значение рассчитывается по всему изображению.

# 2.1.17.2. Работа Fill Area

В начальный момент, при открытии окна Fill Area (Рис. 2-160): параметры настройки имеют значения, которые были установлены при последнем использовании метода; на исходном изображении имеется выделенная область, имеющая стандартные размеры и расположение (в центральной части изображения).

#### <u>Редактирование изображения в режиме заполнения выделенных областей</u> константой (Fill Area by= Const)

Для редактирования изображения в режиме Fill Area by= Const, приведенного в качестве примера на Рис. 2-160, можно рекомендовать следующий порядок действий:

1. Переместить выделенную область на участок изображения, который необходимо отредактировать (Рис. 2-163).



Рис. 2-163. Перемещение выделенной области на участок, который следует отредактировать

2. Изменить размеры выделенной области с учетом размеров редактируемого участка (Рис. 2-164).



Рис. 2-164. Изменение размеров выделенной области

3. Установить необходимый уровень заполнения выделенной области, изменяя значения параметра Z Value при помощи ползунка (Рис. 2-165). Ползунок открывается при щелчке на поле ввода значения параметра Z Value (Рис. 2-166).



Рис. 2-165. Установка необходимого уровня заполнения при помощи ползунка



Рис. 2-166. Поле ввода значения параметра Z Value

При необходимости можно выделять дополнительные области, изменять режимы редактирования и значения параметров настройки.

#### <u>Редактирование изображения в режиме заполнения выделенных областей</u> средним значением (Fill Area by= Average )

Редактирование в данном режиме (Fill area by= Average), является более упрощенным, чем в предыдущем случае (Fill area by= Const):

- выделяются необходимые участки изображения
- и выбирается вариант расчета «среднего» значения.

Пример применения Fill area by= Average показан на Рис. 2-167. Справа – результат, слева – исходное изображение. Выделенные области помечены цифрами. Увеличенные изображения этих областей показаны на Рис. 2-168. Заполнение выделенных областей произведено «средним», рассчитанным по всему изображению (параметр Average from = Entire Scan).



Рис. 2-167 Пример применения Fill area by = Average. Заполнение выделенных областей произведено «средним» уровнем, рассчитанным по всему изображению. Выделенные области обозначены цифрами, увеличенные изображения этих областей показаны на Рис. 2-168.



Рис. 2-168 Увеличенное изображение фрагментов выделенных прямоугольных областей

Режим редактирования Fill area by= Average рекомендуется применять в случае, когда поверхность по структуре является достаточно однородной, высота значительной части поверхности примерно соответствует среднему уровню, и необходимо убрать некоторые отдельные, небольшие объекты, которые значительно отличаются от остальных участков поверхности.

#### 2.1.17.3. Сохранение полученных результатов

Для сохранения, полученные данные (преобразованное изображение) следует отправить в Дерево фреймов в качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (<u>1.3.4</u> Сохранение фреймов на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку Sent Data на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку ОК создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку OK+Ctrl является аналогом действия кнопки Sent Data.

Нажатие на кнопку OK+Ctrl+Alt - создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

# 2.1.18. Set Data Zeros – преобразование координат: сдвиг начала координат к минимуму/максимуму

СЗМ изображению соответствует двумерная дискретная функция  $Z_{ij}^{in} = Z(X_i, Y_j)$ . Область значений функции  $Z_{ij}^{in}$ :  $Z_{ij} \in (Z_{\min}, Z_{\max})$ , область определения функции:  $X_i \in (X_{\min}, X_{\max}), Y_j \in (Y_{\min}, Y_{\max})$ .

В общем случае минимальные значения функции и аргументов, т.е. значения:  $Z_{\min}$ ,  $X_{\min}$ ,  $Y_{\min}$ , могут быть не нулевыми.

#### Метод Set Data Zeros имеет два режима: Min To Zero, Max To Zero.

**Min To Zero** позволяет выполнять преобразование координат - параллельный сдвиг, соответственно: по оси Z на величину  $Z_{min}$ , равную минимальному значению исходной функции; по оси X на величину  $X_{min}$ , равную минимальному значению X, по оси Y на величину  $Y_{min}$ , равную минимальному значению X, по оси Y на

Аналогично, **Мах То Zero** позволяет выполнять параллельный сдвиг, соответственно: по оси Z на величину  $Z_{max}$ , равную максимальному значению исходной функции; по оси X на величину  $X_{max}$ , равную максимальному значению X, по оси Y на величину  $Y_{max}$ , равную максимальному значению Y.

После применения метода **Min (Max) To Zero** к оси *Z*, результирующая функция  $Z_{ij}^{out}$  имеет  $Z_{min} = 0$  ( $Z_{max} = 0$ ), т.е. минимальное (максимальное) значение функции равно нулю. Соответственно, после применения **Min (Max) To Zero** к осям *X*, *Y*, результирующая функция имеет  $X_{min} = 0$ ,  $Y_{min} = 0$  ( $X_{max} = 0$ ).

#### 2.1.18.1. Активация Set Data Zeros

Set Data Zeros активируется стандартным способом: либо через дерево методов, посредством двойного щелчка на Set Data Zeros (Рис. 2-169), либо через главное меню, последовательным выбором пунктов Analysis  $\rightarrow$  Data Transformations  $\rightarrow$  Set Data Zeros.



Рис. 2-169. Активация Set Data Zeros через дерево методов

В результате открывается окно Set Data Zeros.

## 2.1.18.2. Окно Set Data Zeros



Рис. 2-170. Окно Set Data Zeros в начальный момент работы

#### Окно Set Data Zeros (Рис. 2-170) содержит:

- Область 2D-данных, в которой отображается исходное изображение или результирующее изображение, которое появляется после применения Set Data Zeros.
- Панель управления.

Панель управления Set Data Zeros содержит следующие параметры:

- **Type**;
- Choose axis;
- Apply;
- Reset.

Параметр Туре позволяет выбрать тип преобразования: Min To Zero или Max To Zero.

Параметр **Choose** служит для выбора осей, для которых предполагается выполнить преобразование координат и имеет следующие значения (Рис. 2-171):

X – преобразование только для оси X;

- Y преобразование только для оси Y;
- Z преобразование только для оси Z;
- **ХҮ** преобразование для двух осей, **Х** и **Ү**;

XYZ – преобразование для всех осей, X, Y, Z.



Рис. 2-171. Значения параметра Set Data Zeros

Кнопка **Apply** запускает процесс преобразования для тех осей, которые установлены в **Choose axis**.

Кнопка **Reset** позволяет отменить все сделанные преобразования и вернуться к исходному состоянию – к исходной функции.

#### 2.1.18.3. Сохранение полученных результатов

Для сохранения, полученный результат следует отправить в Дерево фреймов в качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (п. <u>1.3.4</u> на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку **Send Data** на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку **ОК** создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки **Send Data**.
- Нажатие на кнопку OK+<Ctrl>+<Alt> создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

### 2.1.19. Axis Strain/Stress – преобразование координат: растяжение – сжатие осей

Иногда для исходной функции  $Z_{ij} = Z(X_i, Y_j)$  возникает необходимость сделать преобразования координат типа растяжение-сжатие, чтобы устранить известные систематические ошибки. Например, ошибки, связанные с калибровочными коэффициентами сканера.

Axis Strain-Stress - позволяет выполнять для исходной функции  $Z_{ij} = Z(X_i, Y_j)$  преобразование координат – растяжение-сжатие по выбранной оси:

 $A_{out} = A_{in}$ \*constant,

где *А* - одна из координат *X*, *Y*, *Z*, а constant - коэффициент сжатия-растяжения.

## 2.1.19.1. Активация Axis Strain/Stress

Axis Strain/Stress активируется стандартным способом: либо через дерево методов, посредством двойного щелчка на Axis Strain/Stress (Рис. 2-172), либо через главное меню, последовательным выбором пунктов Analysis  $\rightarrow$  Data Transformations  $\rightarrow$  Axis Strain-Stress.



Рис. 2-172. Активация Axis Strain-Stress через дерево методов

В результате открывается окно Axis Strain-Stress.

# 2.1.19.2. Окно Axis Strain/Stress



Рис. 2-173. Окно Axis Strain/Stress

Окно Axis Strain/Stress (Рис. 2-173) содержит:

- Область 2D-данных, в которой отображается исходное изображение или результирующее изображение. Последнее появляется после применения Axis Strain/Stress.
- Панель управления Axis Strain/Stress, расположенную справа.

Панель управления Axis Strain/Stress содержит следующие параметры:

- Axis;
- Scale Factor;
- Apply;
- Reset.

Параметр **Ахіз** служит для выбора осей, для которых предполагается выполнить преобразование координат. Он может иметь следующие значения (Рис. 2-174):

X – преобразование только для оси X;

- Y преобразование только для оси Y;
- Z преобразование только для оси Z;

**ХҮ** – преобразование для двух осей, **Х** и **Y** с одинаковым коэффициентом, заданным параметром **Scale factor**.



Рис. 2-174. Выбор параметра Axis

Параметр **Scale factor** задает величину константы – коэффициента сжатиярастяжения выбранной координаты. По умолчанию **Scale factor=1**.

Кнопка **Apply** запускает процесс преобразования (**Axis Strain/Stress**) при тех значениях параметров, которые установлены.

#### 2.1.19.3. Сохранение полученных результатов

Для сохранения, полученный результат следует отправить в Дерево фреймов в качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (п. <u>1.3.4</u> Сохранение фреймов на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку **Send Data** на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку **OK** создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки **Send Data**.
- Нажатие на кнопку OK+<Ctrl>+<Alt> создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

# 2.1.20. Cut Z

Cut Z позволяет «обрезать» исходную функцию  $Z(X_i, Y_j)$  сверху и снизу на заданном уровне.

Cut Z активируется стандартным способом: либо через дерево методов, посредством двойного щелчка на Cut Z (Рис. 2-175), либо через главное меню, последовательным выбором пунктов Analysis  $\rightarrow$  Editing  $\rightarrow$  Cut Z



Рис. 2-175. Активация Cut Z через дерево методов

В результате открывается окно Cut Z.

## 2.1.20.1. Окно Cut Z



Рис. 2-176. Окно Cut Z

Окно Cut Z (Рис. 2-176) содержит следующие элементы:

- Панель исходных 2D-данных, в которой отображается исходное изображение;
- Панель выходных 2D-данных, в которой отображается результирующее изображение, полученное в результате обрезания исходной функции сверху и снизу на заданных уровнях;

- Панель управления Cut Z;
- Гистограмма плотности распределения значений исходной 2D функции.

Панель управления Cut Z

Панель управления (Рис. 2-176) содержит следующие элементы управления:

- Z Max устанавливает верхний уровень «обрезания» функции;
- Z Min устанавливает нижний уровень «обрезания» функции;
- Cut, % задает количество точек функции, в процентах от общего числа точек функции, которые обрезаются сверху и снизу;
- Reset сброс значений к исходному состоянию.

#### 2.1.20.2. Работа Cut Z

При выполнении Cut Z исходная функция Z<sub>in</sub>(i,j) преобразуется следующим образом:

- если в (k,m) точке плоскости XY исходная функция  $Z_{in}(k,m) \ge Z$  Max, то преобразованная функция  $Z_{out}(k,m) = Z$  Max;
- если  $Z_{in}(k,m) \leq Z$  Min, то  $Z_{out}(k,m) = Z$  Min;
- если Z Min  $\leq Z_{in}(k,m) \leq Z$  Max, то  $Z_{out}(k,m) = Z_{in}(k,m)$ .

При открытии окна Cut Z, величина параметра Cut, % имеет значение, установленное при последнем использовании данного метода. Эта величина задает начальные уровни равномерного обрезания (обрезание одинакового числа точек сверху и снизу). В начальный момент, по умолчанию, производится именно равномерное обрезание. На примере, приведенном на Рис. 2-176, величина параметра Cut, % равна 1. Значение параметра Z Max =14.62 нм соответствует тому, что число точек функции лежащих выше этого уровня составляет 1% от общего числа точек функции. Аналогично, значение параметра Z Min =1.13 нм, соответствует тому, что число точек функции.

#### Управление уровнями обрезки функции

Для управления уровнями обрезки функции имеются три параметра Cut, %, Z Max, Z Min. Принята следующая логика работы этих элементов управления.

Если изменяется параметр Cut, %, то производится равномерное обрезание значений функций (обрезание одинакового числа точек функции сверху и снизу). При этом и значения параметров Z Max, Z Min устанавливаются из условия соответствия параметру Cut, %.

Если изменяется один из параметров Z Max, Z Min, то производится неравномерное обрезание, согласно значениям параметров Z Max, Z Min. Действие параметра Cut, % при этом отключается, и его значение не меняется. Однако при

выходе из модуля через кнопку OK сохраняется значение параметра Cut, % и соответствующие ему значения Z Max, Z Min, а не текущие значения.

Для изменения уровней равномерного обрезания следует выполнить следующие действия:

1. Установить курсор на поле ввода параметра **Cut**, % (Рис. 2-177) и щелкнуть левой кнопкой мыши,



Рис. 2-177. Установка курсора на поле вода параметра Cut, %

2. При помощи открывшегося ползунка (Рис. 2-178) установить необходимый уровень параметра Cut, %



Рис. 2-178. Изменение значения параметра Cut, %

В результате установки нового значения параметра Cut, %,

- автоматически устанавливаются новые уровни равномерной обрезки снизу и сверху (значения Z Min и Z Max), соответствующие значению параметра Cut, %.
- на гистограмме изменяется положение маркерных линий, соответственно нижнему и верхнему уровням обрезки.

На примере, приведенном на Рис. 2-178, установлена величина параметра **Cut, % =4,** соответствующие этому значению уровни равномерной обрезки: **Z Min** = 2.02 нм, **Z Max** = 12.16 нм. При изменении параметра **Cut, %**, на гистограмме изменяется положение маркерных линий, соответственно верхнему и нижнему уровням обрезки.

Для изменения верхнего уровня **Z Max** (нижнего уровня **Z Min**) следует захватить курсором за правую (левую) маркерную линию гистограммы и, перемещая ее, установить нужное значение верхнего (нижнего) уровня (Рис. 2-179).



Рис. 2-179. Перемещение правой маркерной линии для установки нужного значения верхнего уровня Z Max

#### <u>Пример применения Cut Z</u>

Данный метод полезен в случае, когда на исходном изображении, кроме основного объекта, представляющего главный интерес, присутствуют другие, второстепенные объекты. И эти второстепенные объекты имеют размах высот, значительно превосходящий размах высот основного объекта. В этом случае, для выделения основного объекта, второстепенные объекты можно обрезать по высоте.

На примере Рис. 2-180, исходное изображение содержит в центральной части основной объект - нанотрубку, имеющую высоту около 30 нм, и второстепенные объекты, имеющие высоту более 500 нм.



Рис. 2-180. Пример применения Cut Z для выделения основного объекта

Для выделения основного объекта – нанотрубки, установлены уровни обрезки исходной функции: **Z Max**=53 нм, и **Z Min**=23 нм. 3D изображение, соответствующее полученной после обрезки функции, приведено на Рис. 2-181.



Рис. 2-181. 3D изображение после применения Cut Z

#### 2.1.20.3. Сохранение полученных результатов

Для сохранения, полученный результат следует отправить в Дерево фреймов в качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (п. <u>1.3.4</u> Сохранение фреймов на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку **Send Data** на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку **OK** создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки **Send Data**.

Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl>+<Alt> - создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

## 2.2. Обработка и анализ 1D-данных

# 2.2.1. Curve Fitting – вычитание из кривой аппроксимирующего полинома

Метод **Curve Fitting** является одним из методов преобразования одномерной функции.

Метод **Curve Fitting** находит полином заданного порядка, который наилучшим образом аппроксимирует исходную кривую (либо выделенные области исходной кривой), и вычитает найденный полином из исходной кривой.

## 2.2.1.1. Активация Curve Fitting

Сигve Fitting активируется стандартным способом: либо через дерево методов, посредством двойного щелчка на Curve Fitting (Рис. 2-182) либо через главное меню, последовательным выбором пунктов Analysis → Fitting → Curve Fitting.



Рис. 2-182. Активация Curve Fitting через дерево методов

В результате откроется окно Curve Fitting.

## 2.2.1.2. Окно Curve Fitting



Рис. 2-183. Окно Curve Fitting

Окно **Curve Fitting** содержит (Рис. 2-183):

- Панель входных 1D-данных, расположенную в верхней части окна. На этой панели отображаются исходная кривая и аппроксимирующий полином заданного порядка (на примере (Рис. 2-183) полином второго порядка). В верхней части находится панель инструментов.
- Информационную строку, расположенную в нижней части панели входных 1D-данных, в которой отображаются параметры полинома.
- Панель выходных 1D-данных, расположенную в нижней части окна. На этой панели отображается результирующая кривая, которая равна разности исходной кривой и найденного аппроксимирующего полинома. В верхней части панели находится панель инструментов.
- Поле для отображения данных маркеров, расположенное справа.
- Панель управления **Curve Fitting**, расположенная справа, внизу.

#### Панель управления Curve Fitting

Параметр **Polynom order** задает порядок аппроксимирующего полинома. Значения этого параметра можно устанавливать в интервале от 0 до 10.

Параметр **Selected Areas** определяет, по какой области рассчитываются параметры аппроксимирующего полинома, если на исходной кривой имеются выделенные области.

Параметр Selected Areas имеет два значения:

- Include в этом случае аппроксимирующий полином определяется по выделенной области;
- Exclude в этом случае аппроксимирующий полином определяется по невыделенной области.

## 2.2.1.3. Pafoma Curve Fitting

В начальный момент, при открытии окна (Рис. 2-183), на панели входных 1D-данных отображается исходная кривая и аппроксимирующий полином, который определяется по всей области определения исходной функции. Порядок полинома соответствует значению параметра **Polynom order**, установленному ранее при последнем использовании **Curve Fitting.** Соответственно, на панели выходных 1D-данных, отображается кривая, получаемая в результате вычитания из исходной кривой найденного аппроксимирующего полинома.

Далее, если изменять значение параметра **Polynom order**, то в интерактивном режиме будет изменяться выходная кривая, поскольку изменятся параметры вычитаемого полинома.

#### Работа по выделенным областям

При открытии окна, по умолчанию расчеты аппроксимирующего полинома производятся для всей области определения исходной функции.

Однако, как только пользователь выделит на кривой хотя бы одну область, расчет аппроксимирующего полинома производятся по точкам выделенной области или исключая выделенную область, в зависимости от состояния параметра Selected Areas.

Для выделения области необходимо:

- 1. Установить курсор на левый (правый) край предполагаемой области.
- 2. При нажатой клавише <Ctrl> нажать левую кнопку мыши и, не отпуская ее, переместить курсор до предполагаемого правого (левого) края области.
- 3. Отпустить левую кнопку мыши, при этом произойдет фиксация выделенной области.

Выделенную область можно перемещать, зацепив ее в центральной части курсором, посредством нажатия левой кнопки мыши. Размеры области можно изменять, зацепив левую или правую границу в средней части курсором и перемещая ее в нужную сторону, тем самым, сжимая или расширяя область.

На Рис. 2-184 показан пример работы **Curve Fitting**. На исходной кривой выделены три области, соответствующие достаточно пологим участкам кривой. По этим участкам рассчитывается полином четвертого порядка (**Selected Areas=Include**, **Polynom Order=4**). В результате вычитания найденного полинома получается результирующая кривая. На приведенном примере показано, как, используя выделение, можно вычесть из исходной кривой нижнюю огибающую.



Рис. 2-184. Curve Fitting по выделенным областям. Пример вычитания нижней огибающей исходной функции

#### 2.2.1.4. Сохранение полученных результатов

Для сохранения, полученные данные (график кривой) следует отправить в Дерево фреймов в качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (п. <u>1.3.4</u>. Сохранение фреймов на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку **Send Data** на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку **OK** создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки **Send Data**.
- Нажатие на кнопку OK+<Ctrl>+<Alt> создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.

## 2.2.2. 1D FFT – одномерное преобразование Фурье

Метод **1D FFT** вычисляет для исходной 1D-функции (функции одного переменного) дискретное преобразование Фурье (*FFT-1D*). В зависимости от выбора, вычисляется и отображается на графике 1D-FFT:

- спектр мощности (*PS*),
- модуль функции FFT-1D (корень квадратный из PS),
- корень квадратный из модуля функции FFT-1D,
- логарифм (натуральный, десятичный) из PS,
- функция спектральной плотности мощности (PSD-1D).

На кривой 1D-FFT вычисляется положение первого максимума, уточняется его положение, и приводится полученное уточненное значение для положения максимума, в пересчете на прямое пространство (в единицах длины).

Одномерное дискретное прямое преобразование Фурье (*FFT-1D*) определяется соотношением (1)

$$FFT-1D \equiv C(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} Zn \exp(-i2\pi \frac{kn}{N})$$
(1)

где:

Zn = Z(Xn) – исходная дискретная функция одной переменной *X*, заданная, на интервале длиной *L*, в *N* точках (*n*=0, 1. 2, ...*N*-1), с одинаковым шагом  $\Delta X$ ,

 $f_k = k \frac{1}{L}$  - пространственная частота (если X – длина), обычная частота (если X – время).

Величина  $\Delta f_k = \frac{1}{L}$  - приращение частоты.

При вычислении функции *FFT-1D* используется быстрое преобразование Фурье (**FFT**).

Функция FFT-1D является комплексной:

FFT-1D=Re(FFT-1D)+i\*Im(FFT-1D)=  $C(f_k) = |C(f_k)| * \exp(i \arg C(f_k))$ ,

где і – мнимая единица.

Спектр модуля определяется как модуль функции преобразования Фурье:

$$\left|C(f_k)\right| = \left|FFT-1D\right| \tag{2}$$

фазовый спектр,  $\phi(f_k)$ , определяется как фаза функции преобразования Фурье (с противоположным знаком):

$$\phi(f_k) = -\arg C(f_k)) \tag{3}$$

Функция спектра мощности, *PS*, определяется как квадрат модуля преобразования Фурье и равна сумме квадратов действительной и мнимой частей функции *FFT-1D* (4):

$$PS = |C(f_k)|^2 = |FFT-1D|^2 = Re^2(FFT-1D) + Im^2(FFT-1D)$$
(4)

Функция спектральной плотности мощности, *PSD*, определяется соотношением (5):

$$PSD = \frac{|C(f_k)|^2}{\Delta f_k} = \frac{|C(f_k)|^2}{1/L} = \frac{PS}{1/L}$$
(5)

Метод **1D FFT** является полезным инструментом для анализа периодичности исходной 1D-функции.

#### 2.2.2.1. Активация метода 1D FFT

Метод 1D FFT активируется стандартным способом: либо через дерево методов, посредством двойного щелчка на 1D FFT (Рис. 2-185), либо через главное меню, последовательным выбором пунктов Analysis  $\rightarrow$  1D FFT.



Рис. 2-185. Активация 1D FFT через дерево методов

В результате открывается окно 1D FFT.

## 2.2.2.2. Окно 1D FFT



Рис. 2-186. Окно **1D FFT** 

Окно 1D FFT (Рис. 2-186) содержит следующие элементы:

- Панель исходных 1D-данных, в которой отображается график исходной 1D-функции;
- Панель выходных 1D-данных, в которой отображается график 1D-FFT. В зависимости от выбора, отображается: функция *PS*, модуль функции *FFT-1D* (корень квадратный из *PS*), корень квадратный из модуля функции *FFT-1D*, логарифм (натуральный, десятичный) из *PS*, функция спектральной плотности мощности (*PSD-1D*);
- Область, в которой отображаются координаты первого максимума выходного графика;
- Панель управления.

#### Панель управления 1D FFT содержит:

- Параметр FFT Scaling – определяет, какая функция (*PS*, модуль (корень квадратный из *PS*), корень из модуля, логарифм *PS*, *PS D*) будет отображаться на графике 1D FFT. Значения, которые может иметь данный параметр, приведены на Рис. 2-187.

Табл. 2-8 содержит значения параметра **FFT** Scaling и соответствующие им функции, которые отображаются на графике **1D FFT** при этих значениях.

FFT Scaling	Power Spectrum
Subtract	Power Spectrum Power Spectrum Density Magnitude Sqrt Magnitude Logarithmic Decibel

Рис. 2-187. Возможные значения параметра FFT Scaling

Табл. 2-8. Функция, отображаемая на	а графике 1D FFT, в зависимости от
	значения параметра FFT Scaling

Значение параметра	Функция, отображаемая на графике
FFT Scaling	
Power Spectrum (PS)	спектр мощности:
	$PS = \operatorname{Re}^{2}(FFT-1D) + \operatorname{Im}^{2}(FFT-1D) =  FFT-1D ^{2}$
Power Spectrum	спектральная плотность мощности:
Density (PSD)	$PSD - \frac{PS}{PSD} - \frac{PS}{PSD}$
	$\Delta f_k = 1/L$
Magnitude	модуль преобразования Фурье:
	$ FFT-1D  = \sqrt{\operatorname{Re}^2(FFT-1D) + \operatorname{Im}^2(FFT-1D)} = \sqrt{PS}$
Sqrt Magnitude	корень квадратный из модуля:
	$\sqrt{ FFT-1D } = \sqrt{\sqrt{\operatorname{Re}^2(FFT-1D) + \operatorname{Im}^2(FFT-D)}} = \sqrt{\sqrt{PS}}$
Logarithmic	натуральный логарифм спектра мощности:
	$\ln(\operatorname{Re}^{2}(FFT-1D) + \operatorname{Im}^{2}(FFT-1D))$
Decibel	десятичный логарифм относительного спектра мощности:
	$10 * \log_{10}((\text{Re}^2(FFT-1D) + \text{Im}^2(FFT-1D)) / Max),$
	где Мах – максимальное значение PS

- Параметр Subtract имеет значения (Рис. 2-188):
  - None для расчетов используется исходная 1D-функция, без какой либо предварительной обработки
  - Average перед тем как рассчитывать 1D FFT, из исходной 1D-функции вычитается среднее значение.

Subtract	Average 💌
	Average
	None

Рис. 2-188. Значения параметра Subtract

## 2.2.2.3. Сохранение полученных результатов

Для сохранения, полученный результат (кривую **1D FFT**) следует отправить в Дерево фреймов в качестве фрейма первого или второго уровня. Далее, из Дерева фреймов сохранение фреймов производится стандартным способом (см. п. <u>1.3.4</u> Сохранение фреймов на стр. <u>19</u>).

Имеется несколько способов отправки полученных данных в Дерево фреймов:

- Нажатие на кнопку **Send Data** на панели инструментов создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным.
- Нажатие на кнопку **ОК** создает в Дереве фреймов фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.
- Нажатие на кнопку **OK**+<Ctrl> является аналогом действия кнопки Send Data.
- Нажатие на кнопку OK+<Ctrl>+<Alt> создает в Дереве фреймов новый фрейм первого уровня, соответствующий полученным данным и создает фрейм второго уровня, прикрепленный к исходному фрейму.