

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
ПРИМЕНЕНИЕ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПОРИСТЫХ АНОДНЫХ МЕМБРАН ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

УДК 620.186:62-278

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ92	Гришанков Алексей Артурович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Воронова Г.А.	к.х.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук И.В.	к.т.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Л.А.	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.04.01 Материаловедение и технологии материалов	Хасанов О.Л.	д.т.н., профессор		

Планируемые результаты обучения ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном языке, для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1.	Способен решать производственные и/или исследовательские задачи, на основе фундаментальных знаний в области материаловедения и технологии материалов
ОПК(У)-2	Способен разрабатывать научно-техническую, проектную и служебную документацию, оформлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации, рецензии
ОПК(У)-3	Способен участвовать в управлении профессиональной деятельностью, используя знания в области системы менеджмента качества
ОПК(У)-4	Способен находить и перерабатывать информацию, требуемую для принятия решений в научных исследованиях и в практической технической деятельности
ОПК(У)-5	Способен оценивать результаты научно-технических разработок, научных исследований и обосновывать собственный выбор, систематизируя и обобщая достижения в области материаловедения и технологии материалов, смежных областях
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен реализовывать на производстве технологии сухого компактирования порошковых материалов, используя методы горячего и холодного прессования, ультразвукового и коллекторного компактирования
ПК(У)-2	Способен диагностировать и модернизировать эксплуатационные свойства материалов с учетом наноразмерной составляющей, используя традиционное и современное оборудование и программное обеспечение приборов
ПК(У)-3	Способен исследовать состав и структуру веществ, с учетом специфики наноразмерных материалов, используя современное оборудование и программное обеспечение приборов
ПК(У)-4	Способен прогнозировать влияние микро- и нано- масштаба на механические, физические, поверхностные и другие свойства материалов при выборе и реализации технологии получения объемных наноматериалов
ПК(У)-5	Способен реализовывать технологии получения наноматериалов с учетом ресурсоэффективности и экологической безопасности

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ О.Л. Хасанов
 (Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации
<i>(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)</i>

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ92	Гришанкову Алексею Артуровичу

Тема работы:

Применение атомно-силовой микроскопии для изучения пористых анодных мембран из оксида алюминия	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ №57-54/С от 26.02.2021

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	1) АСМ изображения в формате mdt 2) СЭМ изображения в формате tif.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1) Разработать систему параметров и минимизировать количество артефактов, которые препятствуют получению информации о рельефе АОА. 2) Проанализировать и систематизировать информацию об артефактах топографических изображений в атомно-силовой микроскопии с целью получения адекватных изображений поверхности и их правильной интерпретации.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	АСМ и СЭМ изображения образцов анодного оксида алюминия
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент...	Кашук И.В., доцент ОСГН ШБИП
Социальная ответственность	Скачкова Л.А., ст. преп. ООД ШБИП
Приложение А (английская часть)	Демьяненко Н.В., ст. преп. ОИЯ ШБИП

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Введение, литературный обзор, методика эксперимента, результаты и их обсуждение, финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение, социальная ответственность (русский язык)

Введение, литературный обзор (английский язык)

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Воронова Г.А.	К.Х.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ92	Гришанков Алексей Артурович		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа - Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки - Материаловедение и технологии материалов
 Уровень образования - магистратура
 Отделение школы (НОЦ) - Отделение материаловедения
 Период выполнения - (осенний / весенний семестр 2020 /2021 учебного года)

Форма представления работы:

магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
11.03.2020	Литературный обзор	15
20.03.2020	Методика эксперимента	30
01.04.2020	Результаты и их обсуждение	15
15.05.2020	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
21.05.2020	Социальная ответственность	15
27.05.2020	Раздел ВКР, выполненный на иностранном языке	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Воронова Г.А.	К.Х.Н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Директор НОИЦ «Наноматериалы и нанотехнологии»	Хасанов О.Л.	д-р.техн.наук, профессор		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ92	Гришанков Алексей Артурович

Школа	Инженерная школа новых производственных технологий	Отделение Школа	Материаловедения
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды 30 %</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Анализ конкурентных технических решений (НИ)</i>	<i>Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ</i>
2. <i>Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)</i>	<i>Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования</i>
3. <i>Составление бюджета инженерного проекта (НИ)</i>	<i>Расчет бюджетной стоимости НИ</i>
4. <i>Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)</i>	<i>Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.</i>

Перечень графического материала

1. *Оценка конкурентоспособности ИР*
2. *Матрица SWOT*
3. *Диаграмма Ганта*
4. *Бюджет НИ*
5. *Основные показатели эффективности НИ*

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.02.2021
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кащук Ирина Вадимовна	к.т.н доцент		08.02.21

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ92	Гришанков Алексей Артурович		08.02.21

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ92	Гришанков Алексей Артурович

Школа	Инженерная школа новых производственных технологий	Отделение Школа	Материаловедения
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

Тема ВКР:

Применение атомно-силовой микроскопии для изучения пористых анодных мембран из оксида алюминия

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p><i>Объект исследования - пористые анодные мембраны из оксида алюминия, атомно-силовая микроскопия.</i></p> <p><i>Область применения - микроэлектроника, газовые сенсоры, фильтры.</i></p>
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> • специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; • организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p><i>"Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 09.03.2021).</i></p> <p><i>ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.</i></p> <p><i>ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.</i></p> <p><i>ГОСТ 22614-77. Система «человек-машина». Выключатели и переключатели клавишные и кнопочные. Общие эргономические требования.</i></p> <p><i>ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видео-дисплейных терминалов (VDT). Часть 5. Требования к расположению рабочей станции и осанке оператора.</i></p> <p><i>ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.</i></p> <p><i>ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.</i></p> <p><i>ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.</i></p> <p><i>СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*.</i></p> <p><i>ГН 2.2.5.3532-18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.</i></p>
<p>2. Производственная безопасность:</p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p><i>Вредные факторы: повышенный уровень шума и т.п., повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны.</i></p> <p><i>Опасные факторы: движущиеся машины и механизмы, подвижные части производственного оборудования и т.п.</i></p>

3. Экологическая безопасность:	<i>Литосфера: отходы при поломки вычислительной техники, отходы канцелярии</i>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<i>Возможные ЧС: пожар в лаборатории, землетрясение. Наиболее типичная ЧС: пожар в лаборатории.</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	22.02.2021
---	-------------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Лариса Александровна	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ92	Гришанков Алексей Артурович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа: 120 с., 73 рис., 28 табл., 38 источников, 4 прил.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, анодный оксид алюминия.

Объектами исследования являются образцы из анодного оксида алюминия.

Цель работы – освоение и оценка применения атомно-силовой микроскопии для изучения анодного оксида алюминия.

В процессе исследования проводились обзор литературы, посвященный современному состоянию применения атомно-силовой микроскопии для исследования анодного оксида алюминия; разработка методики обработки АСМ-изображений; исследование поверхности анодного оксида алюминия.

В результате исследования установлено, что использование атомно-силовой микроскопии имеет актуальную повестку; использование различных методик обработки АСМ-изображений позволяют максимально избежать дефектов и инородных объектов при сканировании образцов.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: разработанная методика обработки АСМ-изображений для исключения дефектов и инородных объектов.

Степень внедрения: НИР.

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ.....	8
СОДЕРЖАНИЕ	9
ВВЕДЕНИЕ	12
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	15
1.1 ТРАДИЦИОННАЯ АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ	15
1.1.1 Принцип работы атомно-силового микроскопа.....	15
1.1.2 Основные режимы атомно-силового микроскопа.....	17
1.2 СОВРЕМЕННАЯ АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ	20
1.2.1 Атомно-силовая микроскопия.....	20
1.2.2 Режимы и методы АСМ.....	20
1.2.3 PeakForce Tapping	21
1.3 АНОДНЫЙ ОКСИД АЛЮМИНИЯ	33
1.3.1 Анодирование алюминия	33
1.3.2 Применение АСМ для исследования анодного оксида алюминия ...	34
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ	37
2.1 ОБОРУДОВАНИЕ	37
2.1.1 Атомно-силовой микроскоп	37
2.2 АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА АСМ-ДААННЫХ	40
2.2.1 Программное обеспечение для обработки АСМ изображений	40
2.2.2 Основные компоненты интерфейса ПО	42
2.2.3 Контейнер изображений	43
2.2.4 Основное меню.....	45
2.2.5 Дерево методов.....	45
2.2.6 Обработка АСМ – изображений.....	46
2.2.7 Flatten Correction 2D	47
2.2.8 Flatten Correction 1D	50
2.2.9 Data transformation.....	53
2.2.10 Editing.....	54
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.....	58
3.1 ВЫБОР КАНТИЛЕВЕРА.....	59

3.2 ОСНОВНЫЕ АРТЕФАКТЫ ПРИ СКАНИРОВАНИИ ОБРАЗЦОВ	63
3.2.1 Элементы, выступающие на поверхности, кажутся больше, чем ожидалось	63
3.2.2 Повторяющиеся аномальные узоры на изображении	64
3.2.3 Ямки и отверстия на изображении кажутся меньше и неглубокими ...	64
3.2.4 Поврежденные или загрязненные наконечники	65
3.2.5 Артефакты сканера.....	65
3.2.6 Эффекты внутренней нелинейности	65
3.2.7 Эффекты гистерезиса	66
3.2.8 Эффекты ползучести	67
3.2.9 Влияние поперечной связи и наклона образца	67
3.2.10 Вибрации.....	68
3.2.11 Влияние обратной связи и других настроек параметров	68
3.3 Обработка АСМ-изображений	69
3.3.1 Программное обеспечение для обработки АСМ-изображений.....	69
3.3.2 Обработка АСМ-изображений анодного оксида алюминия.....	69
ГЛАВА 4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	75
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	75
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений.....	75
4.1.2 SWOT-анализ.....	77
4.2 Планирование научно-исследовательских работ	80
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	80
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения.....	81
4.3 Бюджет научно-технического исследования.....	84
4.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования	85
4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования	86
4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы	86
4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	88
4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	88
4.3.6 Накладные расходы.....	89

4.3.7 Бюджетная стоимость НИР	89
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	90
4.4.1 Интегральный показатель финансовой эффективности.....	90
4.4.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности.....	91
4.4.3 Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки	91
Выводы по разделу.....	93
ГЛАВА 5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	94
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	94
5.2 Производственная безопасность	96
5.3 Анализ вредных производственных факторов	96
5.4 Анализ опасных производственных факторов	98
5.5 Расчет искусственного освещения	99
5.6 Расчет освещенности помещения НИР.....	107
5.7 Экологическая безопасность	109
5.8 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	109
Выводы по разделу.....	112
ВЫВОДЫ.....	113
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ.....	114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	115

ВВЕДЕНИЕ

Атомно-силовая микроскопия – это уникальный метод, позволяющий увидеть и измерить структуру поверхности образца быстро, с высоким разрешением и точностью. Атомно-силовой микроскоп (АСМ), позволяет получить изображение вплоть до нанометрового масштаба. АСМ также имеет различные режимы, которые позволяют изучать свойства поверхности образцов. К таким образцам можно отнести мембраны из анодного оксида алюминия (АОА), для анализа поверхности, которых АСМ является недорогим, быстрым и надежным методом. Электрохимическое оксидирование (анодирование) алюминия в растворах электролитов, позволяет создавать на его поверхности оксидные пленки с самоорганизованным ячеисто-пористым и трубчатым строением [1]. Такие оксиды состоят из тонкого барьерного слоя, прилегающего к металлу, и толстого пористого, представляющего совокупность гексагональных упакованных пор, перпендикулярных металлической подложке. Первые сведения о строении АОА методом СЭМ были получены Келлером (F. Keller) с соавторами более 60 лет назад. По сравнению с СЭМ применение АСМ сейчас значительно упрощает изучение поверхности АОА [2]. Несомненно, сочетание атомно-силовой микроскопии с другими видами микроскопии может быть актуальным в решении проблем высокоточных исследований АОА. Таким образом, сочетание АСМ, СЭМ и ПЭМ позволит проводить высокоточные измерения.

В связи с технологической необходимостью создания наноматериалов с заданной структурой и свойствами, разработка методики точного определения статистических значений параметров структуры АОА на основе анализа АСМ изображений представляется важной задачей.

За последнее время, методы атомно-силовой микроскопии открывают большие возможности для исследования морфологии поверхности и различных свойств. Важно отметить главные преимущества:

1. Исследование в различных средах, такие как воздушная, жидкая, вакуумная и газообразная. Это позволяет изучить широкий спектр свойств: морфология поверхности, механизмы образования пленок и т.п.

2. Исследование объектов, которые не имеют проводимости.

3. Проведение топографических измерений поверхности на несколько порядков в различных направлениях.

4. Способность локальной модификации поверхности, представляет возможность создания новых наноразмерных структур и особенностей поверхности.

Разработка новых современных методов атомно-силовой микроскопии добавляет ряд проблем при исследовании различных объектов:

1. Влияние на полученные результаты измерений, к таким относят материальные (особенности микроскопа) и методические (выбор режимов, среды и т.д.).

2. Интерпретация АСМ изображений, которые получены при различных условиях.

3. Метрологическое обеспечение АСМ данных, с помощью которых получают количественные характеристики, описывающие свойства рельефа поверхности.

Указанные проблемы решались в данной работе на примере коммерческого АОА.

Важной задачей остается обработка и анализ полученных АСМ изображений, зачастую сделать хорошее изображение не получается, так как влияют множество факторов, которые снижают качество. К таким факторам относятся: состояние зонда микроскопа, время сканирования, условия сканирования, различного рода помехи и т.д. Для получения качественного изображения прибегают к методам и различным программам обработки.

Цель работы – освоение и оценка применения атомно-силовой микроскопии для изучения анодного оксида алюминия.

Задачи работы:

- 1) Разработать систему параметров и минимизировать количество артефактов, которые препятствуют получению информации о рельефе АОА.
- 2) Анализ и систематизация информации об артефактах топографического изображения в атомно-силовой микроскопии для получения соответствующих изображений поверхности и их правильной интерпретации.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В связи с выбранным направлением исследования при проведении литературного обзора были освящены следующие направления: традиционная атомно-силовая микроскопия; современная атомно-силовая микроскопия; применение атомно-силовой микроскопии для изучения анодного оксида алюминия.

1.1 ТРАДИЦИОННАЯ АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

1.1.1 Принцип работы атомно-силового микроскопа

Атомно-силовая микроскопия относится к семейству проксимальных зондовых микроскопов для анализа поверхности и ее свойств на атомно-молекулярном уровне.

На расстоянии около одного ангстрема между атомами образца и атомом зонда возникают силы отталкивания, а на больших расстояниях – силы притяжения.

Зондовый датчик — это упругая балка – кантилевер, закрепленную на кремниевой основе – чипе зондового датчика (1 на рис. 1.1). На свободном конце кантилевера (2 на рис. 1.1) располагается зонд в виде острой иглы (3 на рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Схематичное изображение зондовых датчиков:

а) прямоугольный кантилевер, б) треугольный кантилевер

Зондовые датчики с треугольным кантилевером имеют при тех же размерах большую жесткость и, следовательно, более высокие резонансные частоты. Чаще всего они применяются в колебательных АСМ методиках [3].

Кантилевер, двигаясь относительно поверхности и реагируя на силовое взаимодействие, регистрирует его рельеф (рис. 1.2).

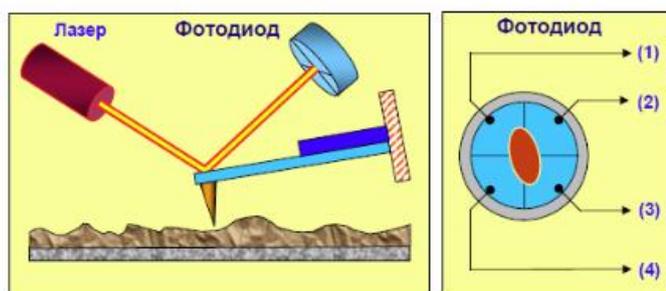


Рисунок 1.2 - Схематичное изображение оптической системы АСМ

Оптическая система АСМ юстируется так, чтобы излучение лазера фокусировалось на консоли зондового датчика, а отраженный пучок попадал в центр фоточувствительной области фотоприемника. В качестве позиционно - чувствительных фотоприемников применяются четырехсекционные полупроводниковые фотодиоды. Основные регистрируемые параметры — это деформации изгиба консоли под действием Z-компонент сил притяжения или отталкивания (F_Z) и деформации кручения консоли под действием латеральных компонент сил (F_L) взаимодействия зонда с поверхностью.

Разность токов вида $\Delta I_Z = (\Delta I_1 + \Delta I_2) - (\Delta I_3 + \Delta I_4)$ пропорциональна изгибу консоли под действием силы, действующей по нормали к поверхности образца. Комбинация разностных токов вида $\Delta I_L = (\Delta I_1 + \Delta I_4) - (\Delta I_2 + \Delta I_3)$ характеризует изгиб консоли под действием латеральных сил (рис. 1.3б).

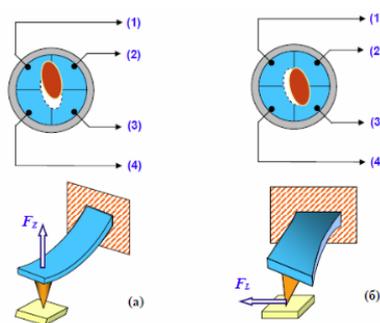


Рисунок 1.2 - Схематичное изображение оптической системы АСМ. Деформации изгиба консоли под действием: а) сил притяжения или отталкивания, б) латеральных компонент сил

В зависимости от типа взаимодействия АСМ может работать в одном из нескольких режимов. Кантилевер изгибается под действием контактных, действующих на расстоянии Ван дер Ваальсовых, электрических и магнитных сил.

Силы Ван дер Ваальса сначала являются силами притяжения, а при дальнейшем сближении переходят в силы отталкивания.

1.1.2 Основные режимы атомно-силового микроскопа

Атомно-силовой микроскоп имеет несколько видов режимов, они подразделяются по характеру действия сил между кантилевером и поверхностью образца.

1. Контактный режим (contact mode).
2. Полуконтактный режим (semi-contact mode).
3. Бесконтактный режим (non-contact mode).

На рисунке 4 представлено схематичное изображение режимов системы АСМ, 0 - соответствует нулевому расстоянию между ядрами атома на поверхности и наиболее выступающего атома кантилевера. Поэтому ноль силы находится на конечном расстоянии, соответствующем границе электронных оболочек этих атомов (при перекрытии оболочек возникает отталкивание). Если взять за ноль границы атомов, то сила обратится в ноль в нуле расстояния.

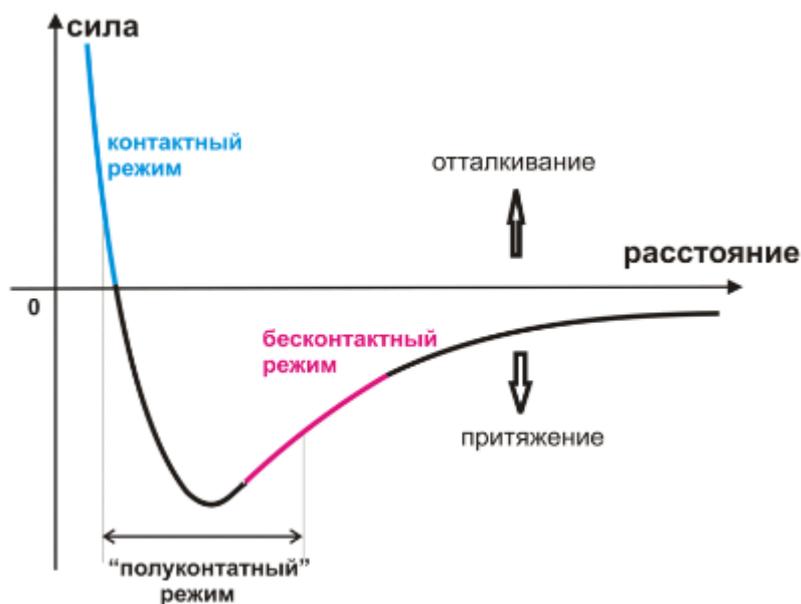


Рисунок 1.3 - Схематичное изображение режимов системы АСМ.

В контактном режиме микроскоп является измерителем неровности поверхности. Наконечник кантилевера находится в непосредственном контакте между образцом и поверхностью. Сканирование осуществляется, как правило, в

режиме постоянной силы, когда система обратной связи поддерживает постоянной величину изгиба кантилевера. Наибольшая, по сравнению с другими методами, помехоустойчивость. Наибольшая достижимая скорость сканирования. Является единственным методом АСМ, позволяющим достичь атомарного разрешения. Например, в работе [4] проводится развитие АСМ-диагностики мембран и каталитических слоев. Контактный режим обеспечивает наилучшее качество сканирования поверхностей с резкими перепадами рельефа (рис. 1.5).

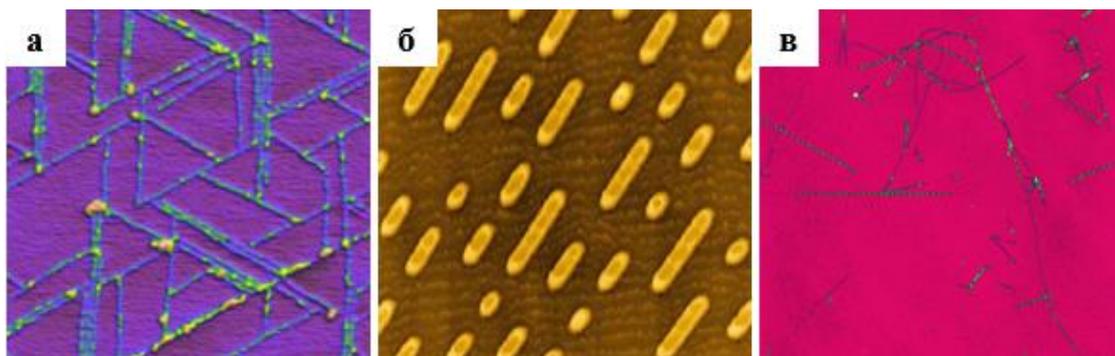


Рисунок 1.4 – АСМ изображения, снятые в контактном режиме. а) Ламеллы гексаглицина на поверхности пиролитического графита, б) CD диск (Al реплики), в) Амилоидные фибриллы фрагмента прионного пептида человека PrP82-146 [4]

При работе в полуконтактном режиме также возбуждаются колебания кантилевера. В нижнем полупериоде колебаний кантилевер касается поверхности образца. Такой метод является промежуточным между контактными и бесконтактными. Наиболее универсальный из методов АСМ, позволяющий на большинстве исследуемых образцов получать разрешение 1-10 нм. Латеральные силы, действующие на зонд со стороны поверхности, устранены - упрощает интерпретацию получаемых изображений (рис. 1.6).

Например, в работе [5] с помощью полуконтактного режима был исследован участок поверхности образца, полученного в результате эпитаксиального наращивания антимонида индия, что позволило выявить на поверхности арсенида индия массив отдельно стоящих квантовых точек. А в работе [6] полуконтактный режим применен для исследования структурных и прочностных свойств ультратонких пленок полиблочного сополимера лестничного фенилсилсеквиоксана (ЛФС) и полидиметилсилоксана (ПДМС).

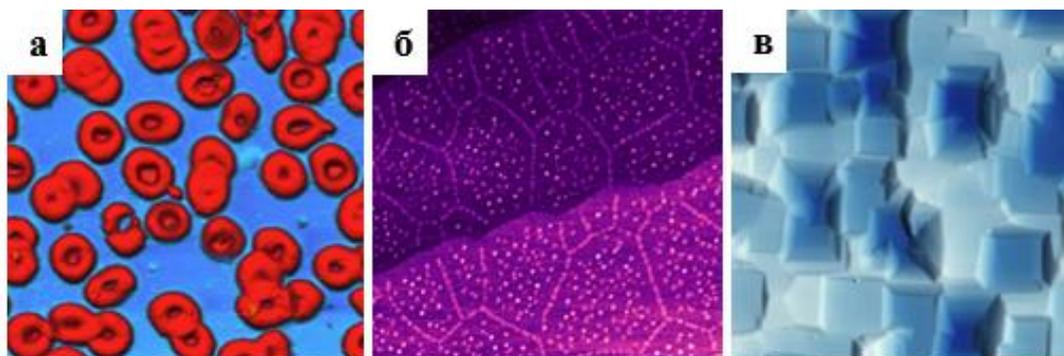


Рисунок 1.5 – АСМ изображения, снятые в полуконтактном режиме. а) Клетки крови, б) «Наноостровки» кремния, в) Неполированный кремний [6]

При работе в бесконтактном режиме пьезовибратором возбуждаются колебания зонда на резонансной частоте. Сила, которая действует со стороны поверхности, приводит к сдвигу амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик зонда, и амплитуда и фаза изменяют значения. Система обратной связи, как правило, поддерживает постоянной амплитуду колебаний зонда, а изменение частоты и фазы в каждой точке записывается. Однако возможно установление обратной связи путём поддержания постоянной величины частоты или фазы колебаний. Самое главное достоинство данного метода - отсутствует воздействие зонда на исследуемую поверхность.

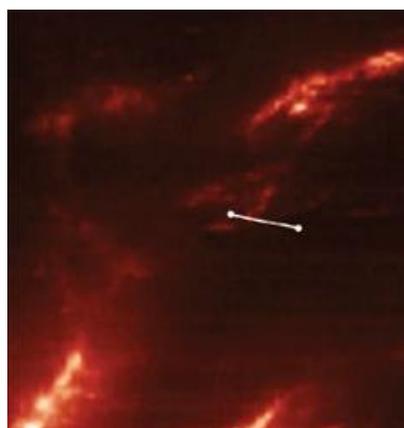


Рисунок 1.6 – АСМ изображение, снятое в бесконтактном режиме. Углеродные нанотрубки

Процедура подготовки образцов для атомно-силовой микроскопии заключается в их иммобилизации на ровной подложке. Материал подложки можно ва-

рывать в широких пределах в зависимости от поставленных задач. Традиционно в качестве субстрата используются атомно-гладкие подложки из слюды, графита и других слоистых материалов, а также различные стёкла, полимерные материалы и металлические поверхности [7].

1.2 СОВРЕМЕННАЯ АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

1.2.1 Атомно-силовая микроскопия

По мере того, как атомно-силовая микроскопия входит в свое пятое десятилетие в качестве основного метода для обеспечения исследований всех уровней, ее данные с высоким разрешением помогли исследователям почти в бесчисленном множестве дисциплин и приложений.

Bruker ведет расширение возможностей атомно-силового микроскопа с самого начала, и их системы являются самыми цитируемыми АСМ в мире. В последнее время идет развитие инновационных возможностей в области естественных наук, непревзойденных комбинаций разрешения и скорости для исследований материалов и промышленного производства, а также новых механических и электрических режимов АСМ для передовых наноразмерных исследований.

В дополнение к использованию традиционных методов АСМ, Bruker имеет ряд преимуществ таких режимов, как «Contact Mode» и «Tapping Mode», АСМ высокого разрешения Bruker имеют запатентованную функцию «PeakForce Tapping», позволяющую проводить новые исследования с уникальными наномеханическими, электрическими и химическими измерениями, как показано в более чем 1000 рецензируемых публикациях.

1.2.2 Режимы и методы АСМ

Понимание характеристик материалов и молекул на наноуровне часто требует визуализации топографии поверхности или структуры образца. Но сама по себе топография рассказывает лишь часть истории.

Построенный на основе основных режимов визуализации-контактного режима и режима наведения-Bruker предлагает режимы АСМ, которые позволяют пользователям исследовать электрические, магнитные свойства образцов или

материалов. По мере развития исследований пользователи требуют большей универсальности в доступных режимах и методиках.

Новая инновационная технология «PeakForce Tapping» представляет собой новую парадигму формирования изображений, которая была включена в несколько режимов, обеспечивая параллельное получение данных о топографических, электрических и механических свойствах.

Продвигая информационное содержание изображений на шаг вперед, новые модели DataCube обеспечивают гиперспектральные «большие данные» с электрическими рампами и кривыми силового расстояния на каждом пикселе, а AFM-nDMA фиксирует вязкоупругие свойства и их частотную зависимость.

Bruker предлагает универсальный ассортимент АСМ-инструментов, которые могут быть оснащены множеством режимов сканирования, что является решением для любого применения.

1.2.3 PeakForce Tapping

Эксклюзивный PeakForce Tapping стал самым значительным научным прорывом в технологии атомно-силовых микроскопов (АСМ) с момента внедрения Tapping Mode. Он обеспечивает беспрецедентную визуализацию высокого разрешения, расширяет измерения АСМ до ряда образцов, к которым ранее не было доступа, и уникальным образом позволяет одновременно наноразмерное картирование свойств.

PeakForce Tapping позволяет исследователю точно контролировать взаимодействие зонд-образец, обеспечивая минимально возможную нагрузку на изображение. Такое превосходное управление усилиями позволяет получать АСМ-изображения с самым высоким разрешением для широкого диапазона типов образцов, от самых мягких биологических образцов до очень твердых материалов.

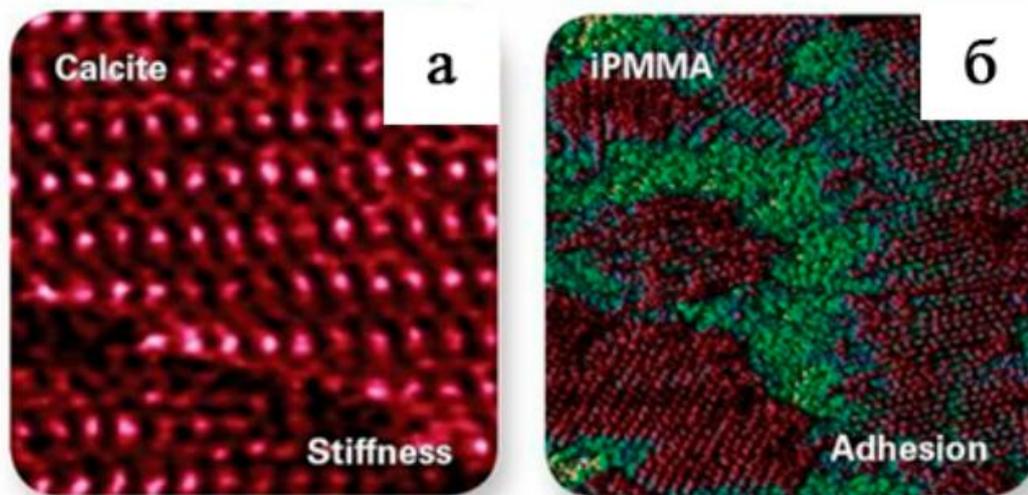


Рисунок 1.7 – а) Жесткость точечного разрешения дефекта на кальците (изображение 15 нм), б) адгезия субмолекулярного разрешения на iPMMA (изображение 100 нм)

Чувствительность к силе пиконьютоны (пН) PeakForce Tapping одновременно и уникально сочетает в себе высочайшее разрешение АСМ-изображения с количественным, наноразмерным отображением электрических, механических, биологических и химических свойств.

В методе PeakForce Tapping зонд периодически наносит ответный удар по образцу, а сила взаимодействия рН-уровня измеряется непосредственно по прогибу кантилевера. Реальный контур обратной связи (не силовой триггер) удерживает пиковую силу до 10 пН. при частоте срабатывания до 8 кГц, в воздухе и жидкости.

PeakForce Tapping идеально подходит как для исследований материалов, так и для биологических образцов благодаря своей беспрецедентно низкой силе изображения и простоте использования. Нет необходимости в настройке кантилевера. Превосходный контроль усилия поддерживает целостность наконечника и образца, что позволяет последовательно проводить точные измерения с высоким разрешением даже самых маленьких структур, от атомных дефектов до ДНК с двойной спиралью.

Однако самая большая сила технологии PeakForce Tapping заключается в ее способности одновременно включать и улучшать другие техники корреляционного и количественного картирования. Она предоставляет новую механическую, электрическую и химическую информацию о ранее недоступных образцах и предоставляет новые возможности, начиная с мягкой материи и заканчивая перовскитами и энергетическими исследованиями.

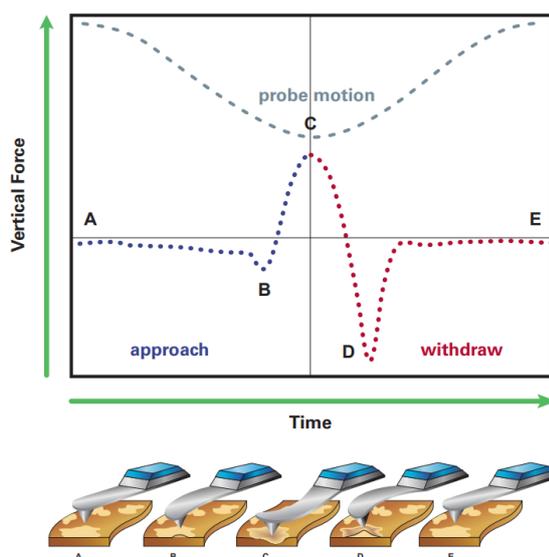


Рисунок 1.8 – График зависимости вертикальной силы от времени при работе на АСМ с PeakForce Tapping

Используя технологию PeakForce Tapping, PeakForce QNM наносит на карту и различает наномеханические свойства, включая модуль, адгезию, рассеивание и деформацию, одновременно визуализируя топографию образца с атомным разрешением. Так как он напрямую контролирует пиковую нормальную силу и минимизирует поперечную силу на зонде, он не разрушителен как для наконечника, так и для образца. Так как данные о расстоянии силы анализируются напрямую, нет никакой двусмысленности в отношении источника контраста изображения, как это часто происходит в других методиках. Полученные количественные данные могут помочь идентифицировать компоненты и их смешивание на границах сопряжения, а также отобразить механические свойства с ранее недостижимым разрешением.

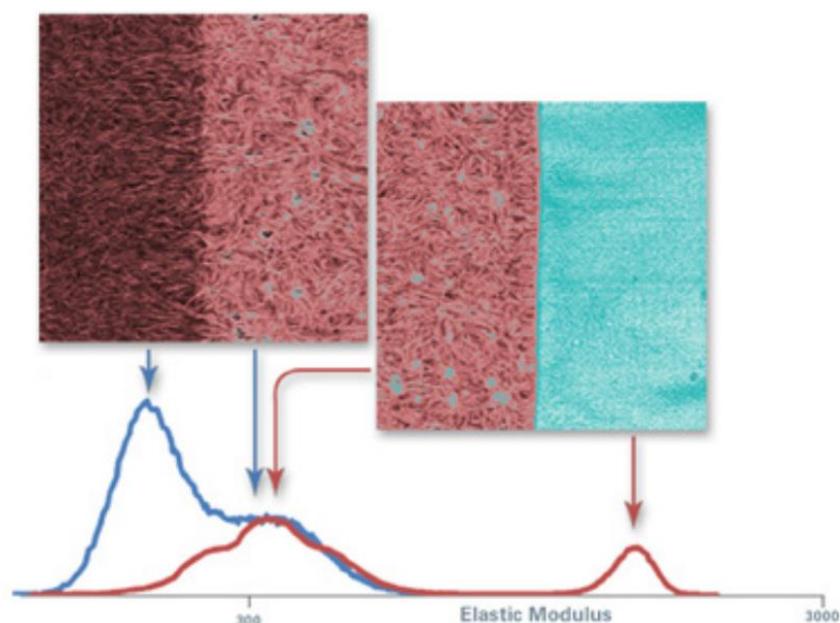


Рисунок 1.9 – Изображения PeakForce QNM многослойной упаковки, показывающие тонкую структуру и количественные значения модуля вблизи фазовых границ.

Размер изображений 4 мкм.

PeakForce QNM обеспечивает:

Картирование наномеханических свойств с высоким разрешением.

Высокоскоростное, наиболее количественное наномеханическое картирование.

Широчайший диапазон рабочих характеристик для образцов, от чрезвычайно мягких материалов (~1 кПа) до твердых металлов (100 ГПа).

Там, где PeakForce QNM анализирует каждую силовую кривую в режиме реального времени для создания карт свойств материала, PeakForce Capture выходит за рамки изображения и предоставляет кривые действительных сил в каждом пикселе, в дополнение к рассчитанным каналам свойств. Когда эта функция включена, кривые усилия из изображения PeakForce QNM сохраняются вместе со стандартным файлом изображения. Это позволяет проводить прямые вычисления с помощью анализа Nano Scope - вплоть до разрешения атомных дефектов.

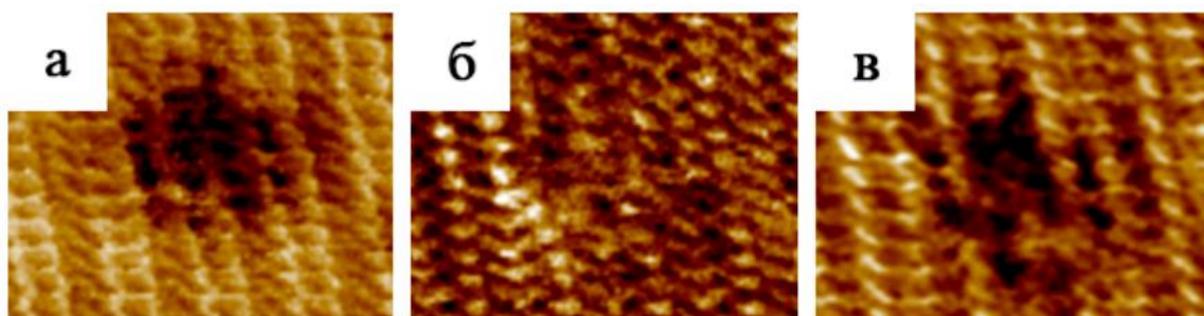


Рисунок 1.10 – PeakForce QNM обнаруживает молекулярный дефект на кристалле полидиацетилена, на воздухе. Отдельные молекулы размещаются в картах высоты (а), а также адгезии (б) и плотности (в) с заметным снижением плотности в месте дефекта.

Размер изображения 10 нм.

PeakForce Capture обеспечивает:

- Высочайшее разрешение силового картирования
- Чувствительность к неожиданным событиям, не запечатленная другими методами.
- Пользовательские модели с помощью функций экспорта данных.

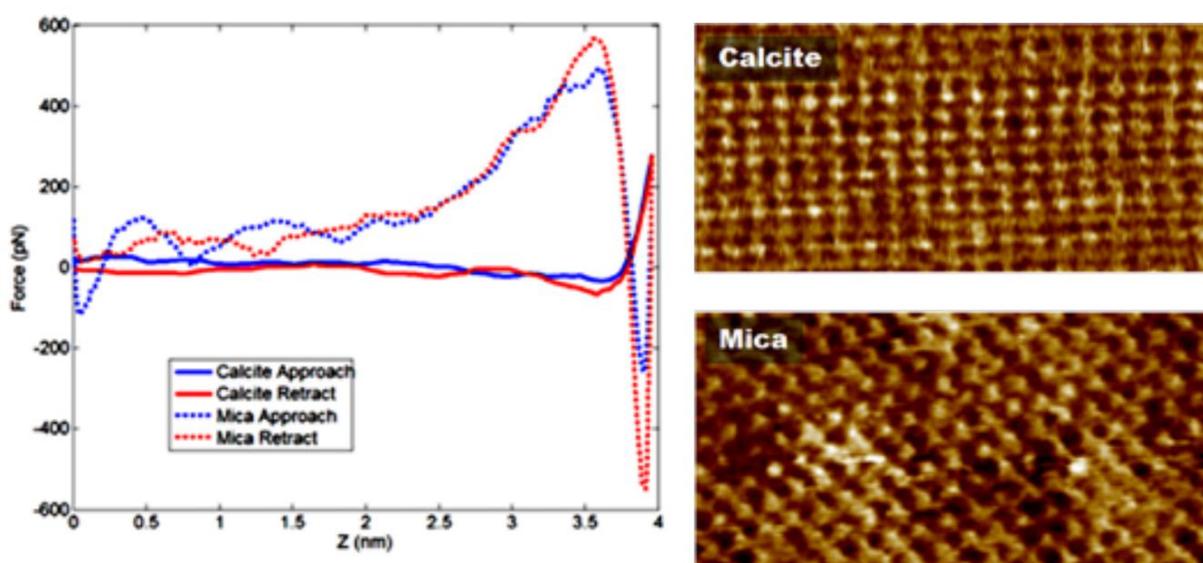


Рисунок 1.11 – Данные PeakForce Capture: Атомное разрешение на кальците и слюде, индивидуальные силовые кривые для каждого пикселя показывают различия во взаимодействии зонд-образец. Размер изображений 10 нм.

PeakForce TUNA - идеальный метод измерения проводимости хрупких образцов, таких как органическая фотовольтаика, проводящие нанотрубки и наночастицы. Он преодолевает ограничения традиционных методов контактного режима на основе проводящего АСМ, устраняя поперечные силы и избегая повреждения образца, что позволяет проводить рутинную токовую визуализацию высокого разрешения.

Теперь пользователи могут воспользоваться преимуществами как полного диапазона токов от f_A до μ_A , так и непосредственно коррелированной количественной визуализации наномеханических свойств PeakForce QNM с одним графиком. PeakForce TUNA также может быть интегрирована с контролем окружающей среды для регулирования уровня кислорода и воды вплоть до ppm для наиболее чувствительных образцов.

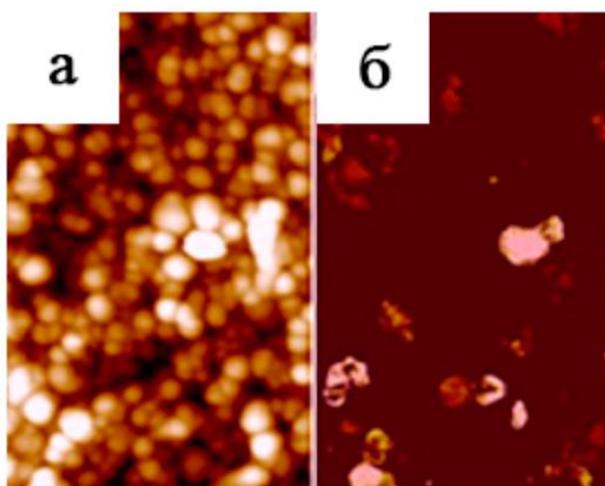


Рисунок 1.12 – Карты высоты а) и тока б) вертикальных углеродных нанотрубок PeakForce TUNA, невозможные при контактном режиме. Размер изображения 1 мкм.

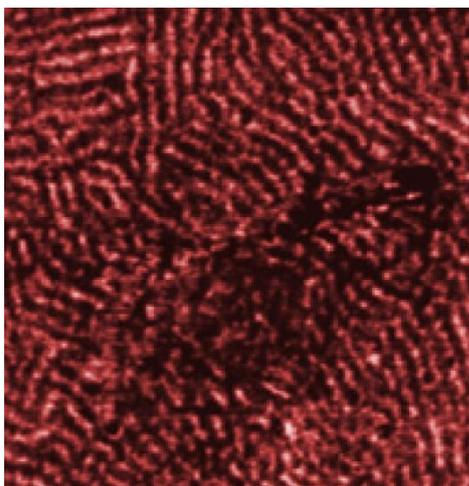


Рисунок 1.13 – Карта PeakForce TUNA показывает текущие пути в пленке РЗНТ. Размер изображения 500 нм.

PeakForce TUNA предлагает:

- Картирование токов высочайшего разрешения на самых хрупких образцах.
- Непревзойденная повторяемость и последовательность в наноэлектрических измерениях.
- Связанные с корой наномеханические и наноэлектрические свойства.

PeakForce KPFM™ улучшает производительность измерений по сравнению с традиционными методами зондовой силовой микроскопии, обеспечивая высочайшее пространственное разрешение и наиболее точные измерения поверхностного потенциала. Эти улучшения были достигнуты благодаря сочетанию PeakForce Tapping, запатентованных алгоритмов сканирования и собственных разработок Bruker. Уникальность PeakForce KPFM заключается в том, что он обеспечивает наиболее точные и согласованные измерения для различных типов материалов. Он может быть использован с PeakForce QNM для одновременной коррелированной топографии, а также для картирования электрических и механических свойств на широком спектре образцов. Он также преодолевает проблемы, связанные с простотой использования традиционных методов KPFM,

работая в режиме ScanAsyst, позволяя получать данные экспертного качества пользователям любого уровня.

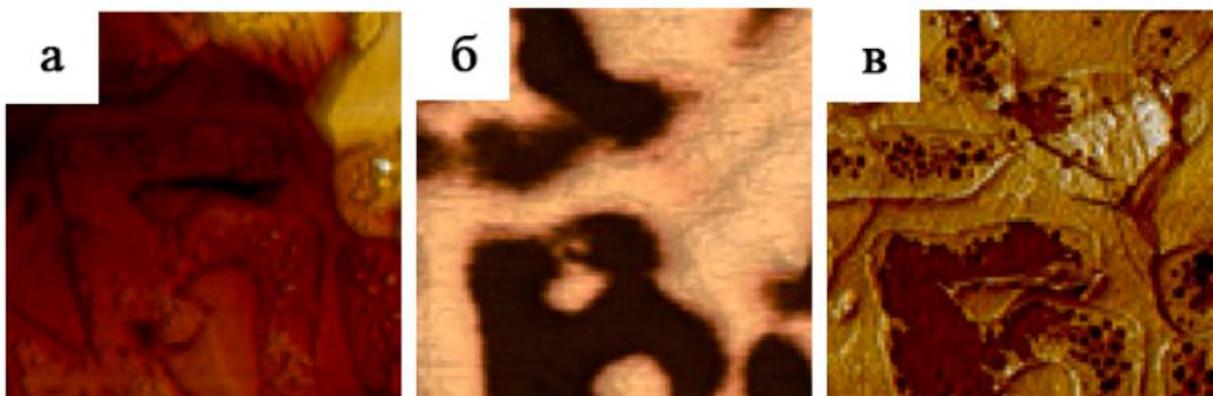


Рисунок 1.14 – PeakForce KPFM высота (а), адгезия (б) и потенциал поверхности (в) изображения Sn-Pb. Точно отображается разность рабочих функций, одновременно выявляется наноразмерная фазовая структура в карте адгезии. Размер изображения 4 мкм.

PeakForce KPFM получает:

- Самые точные, воспроизводимые и чувствительные измерения рабочих функций.
- Передовое пространственное разрешение в сочетании с отсутствием артефактов потенциального контраста
- Количественное картирование количественных наномеханических свойств

PeakForce SECM впервые обеспечивает измерения электрохимической активности с разрешением до 100 нм. Это позволяет найти новые области применения - от катализа и коррозии до исследований солнечного топлива и батарей. Для того, чтобы сделать такую сложную характеристику рутинной задачей, PeakForce SECM сочетает силовое управление пиконьютоном PeakForce Tapping с эксклюзивным решением в виде рифленой «мантии». Эти зонды PeakForce SECM предварительно смонтированы для безопасного манипулирования; изготовлены партиями; тщательно протестированы; и высоко оптимизированы для высокого пространственного разрешения в SECM.

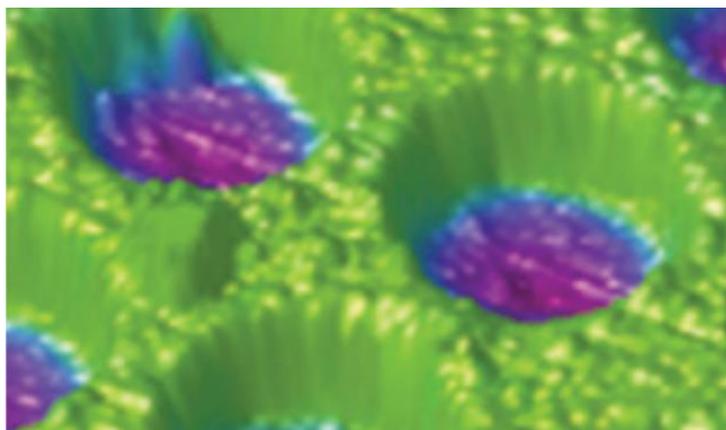


Рисунок 1.15 – 3D топография наномногоэлектрода (Au-SiO₂), покрытого слоем оболочки ЕС тока.

PeakForce SECM предоставляет:

- Ранее недоступную электрохимическую информацию с пространственным разрешением <100 нм.
- Одновременное электрохимическое, электрическое и механическое картирование в жидкости
- Надежные, простые в использовании серийные датчики, специально разработанные для SECM.

PeakForce TUNA - лучший метод измерения проводимости с высоким разрешением на хрупких образцах. Ее преимущество еще больше в жидкости, где поверхности часто повреждаются легче, так как поверхностные адсорбаты становятся более подвижными. Измерение проводимости в присутствии электролита требует изолированного зонда, где обнажается только выступающая вершина, что и обеспечивает PeakForce SECM зонд. Следовательно, сочетание PeakForce TUNA с PeakForce SECM зондом обеспечивает первое и единственное решение для измерения электропроводности в присутствии высокопроводящих жидкостей для энергетических исследований, биосовместимых устройств и многих других применений.

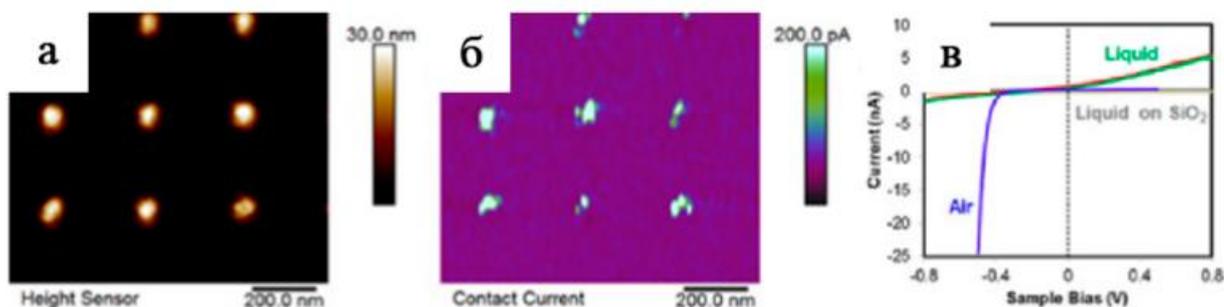


Рисунок 1.16 – Измерение PeakForce TUNA с помощью зонда SECM в жидкости на массиве нанoeлектродов (диаметр 125 нм и период 300 нм): а) топография; б) контактный ток; и в) характеристики ток-напряжение нанoeлектродов в воздухе и в водном растворе.

Преодолевая ограничения традиционных режимов, PeakForce Tapping позволяет проводить новые исследования в широком спектре областей BioAFM, от отдельных молекул до клеток и тканей. Он сочетает в себе высочайшее пространственное разрешение на биологических структурах с количественной наномеханикой в самом широком доступном частотном диапазоне.

В молекулярных изображениях высокого разрешения PeakForce Tapping изображения отдельных биомолекул выявили вариации в структуре двойной спирали ДНК. В клеточной визуализации PeakForce Tapping позволил получить первые и единственные изображения микровилли на живых клетках.

PeakForce QNM позволил провести высокоэффективные работы по наномеханическому картированию высокого разрешения на мембранах, выявив вариации жесткости субмолекулярных узлов. На живых клетках карта распознавания на основе PeakForce QNM объединила в себе высокое пространственное разрешение, количественные данные и оптическую микроскопию для получения подробного представления о процессах заражения клеток.

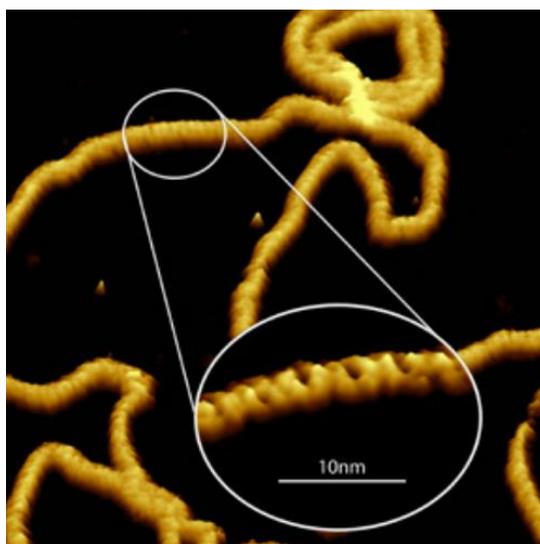


Рисунок 1.17 – Структура ДНК с двойной спиралью, показывающая основные и второстепенные бороздки, отображенные с помощью PeakForce Tapping.

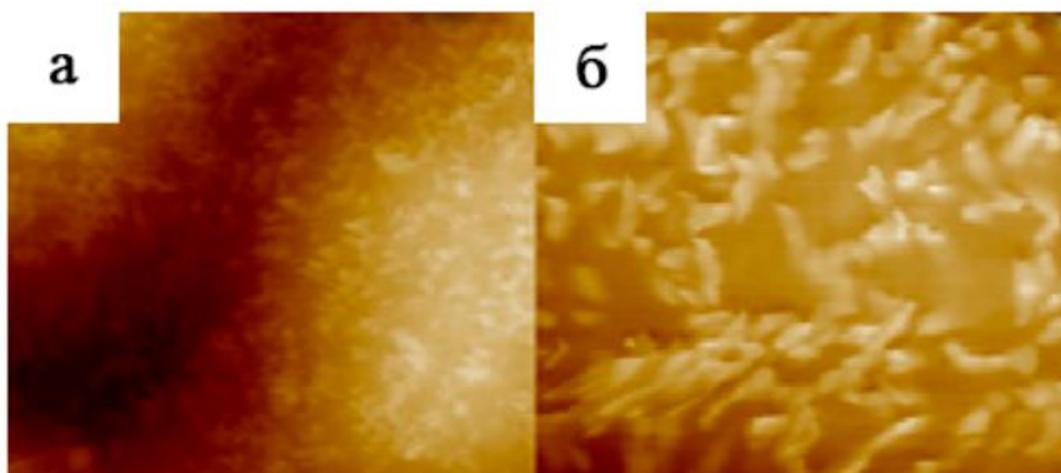


Рисунок 1.18 – Первые и единственные АСМ изображения, разрешающие отдельные микро-вилли на живых MDCK клетках. Размер изображения 25 мкм а), 10 мкм б).

PeakForce QNM включает:

- Субмолекулярное разрешение картирования механических, химических и биологических взаимодействий.
- Высокоскоростное, количественное механическое свойство и картирование адгезии живых клеток.
- Простота использования, делая каждого пользователя экспертом в области АСМ.

ScanAsyst — это технология оптимизации изображения на основе PeakForce Tapping, которая позволяет каждому пользователю создавать изображения с высоким разрешением АСМ с помощью сканирования одним касанием. Она устраняет необходимость в навигации по сложным интерфейсам АСМ и настройке параметров, автоматизируя PeakForce Tapping таким образом, что изображения высочайшего качества могут быть созданы любым пользователем, независимо от уровня опыта. «Интеллектуальные» алгоритмы автоматически и непрерывно отслеживают качество изображения и производят соответствующие настройки параметров. Пользователь просто выбирает область сканирования и размер сканирования для образца, в воздухе или жидкости, по сути, предоставляя готовое решение для получения АСМ изображений.

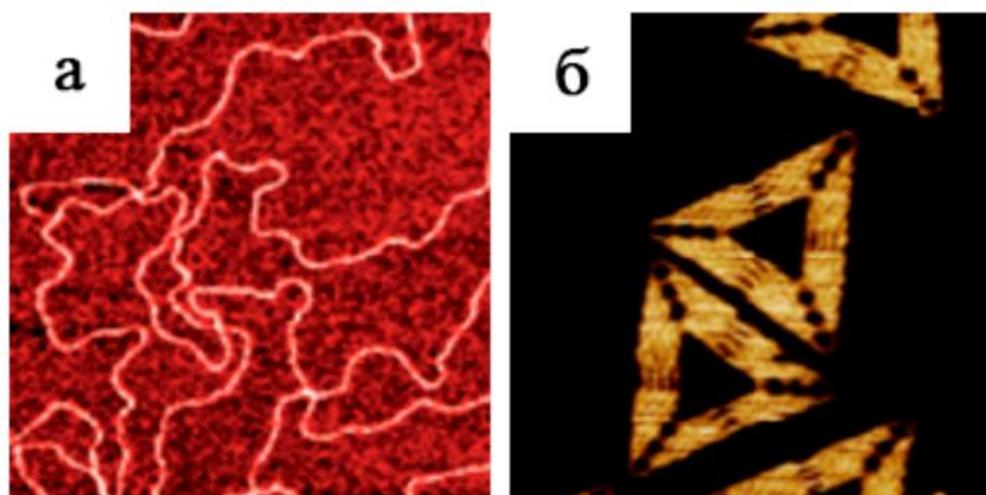


Рисунок 1.19 – Изображения, полученные с помощью ScanAsyst: а) ДНК.

Размер изображения 1 мкм, б) Треугольник ДНК оригами, структура которого визуализирована в жидкости. Размер изображения 300 нм.

ScanAsyst включает:

- Простое, последовательное измерение широкого спектра образцов для исследования материалов.
- Однокнопочные повторяемые измерения шероховатости для применения в пластинах.
- Самая простая и стабильная визуализация клеток и молекул с высоким разрешением.

1.3 АНОДНЫЙ ОКСИД АЛЮМИНИЯ

1.3.1 Анодирование алюминия

Алюминий является активным металлом, он может самопроизвольно окисляться на воздухе, образуя тонкий оксидный слой толщиной около 100 нм. Люди использовали анодирование алюминия для создания плотной оксидной пленки для защиты поверхности алюминия, этот слой называется пассивирующей пленкой, также используется в качестве украшения поверхности, позже использовался в качестве диэлектрических конденсаторов и т.д. [8-9].

В 1857 году немецкий химик Буфф впервые обнаружил, что алюминий может подвергаться электрохимическому окислению в водном растворе с образованием оксидного слоя. Это явление было названо «анодированием», поскольку обрабатываемая алюминиевая деталь являлась анодом в электролизе. В начале 1920-х годов явление, наблюдаемое Буффом, использовалось в промышленных целях, например, для защиты деталей гидросамолетов от агрессивной морской воды.

В зависимости от условий синтеза и используемого электролита могут быть сформированы два типа пленок АОА (рис. 1.21). Пленки барьерного типа могут быть получены в нерастворимых оксидных электролитах ($5 < \text{pH} < 7$) [10], например, в растворах борной кислоты. Пленки пористого типа образуются в слаборастворимых электролитах, таких как серная, фосфорная и щавелевая кислоты.

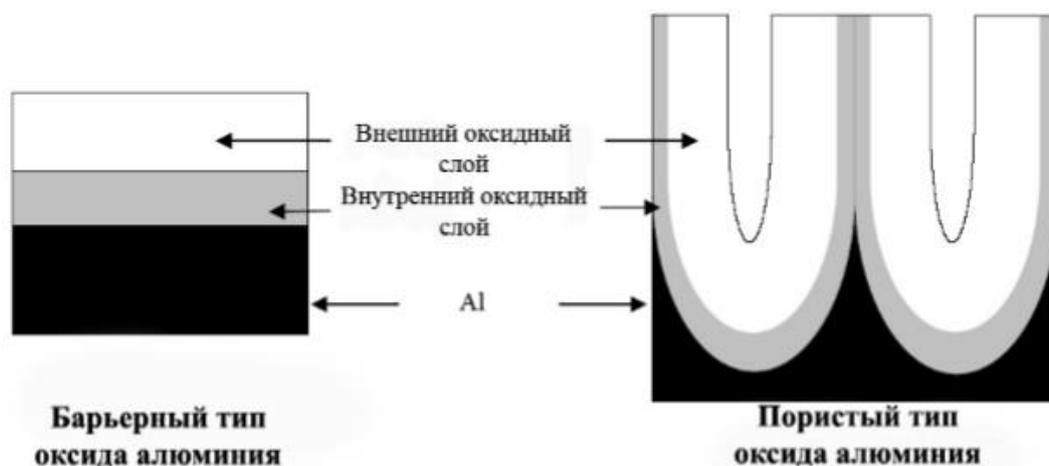


Рисунок 1.20 – Схема пленок оксида алюминия

Два типа пленок АОА состоят из двух частей: внешнего и внутреннего слоев (рис. 1.21). Внутренний слой представляет собой относительно чистый АОА, а внешний слой - анодированную оксидированную пленку с примесью.

Поскольку в 1953 году Келлер впервые сообщил об использовании электрохимических методов для приготовления глиноземной пористой затворки, исследования глиноземной затворки продолжались в течение полувека, с конца 1980-х годов люди заинтересовались полилитической пленкой оксида алюминия, поскольку эта пленка имеет уникальную структуру, близко к поверхности алюминиевого базового слоя тонкий и плотный барьер. Структура АОА показана на рисунке 1.22 [10].

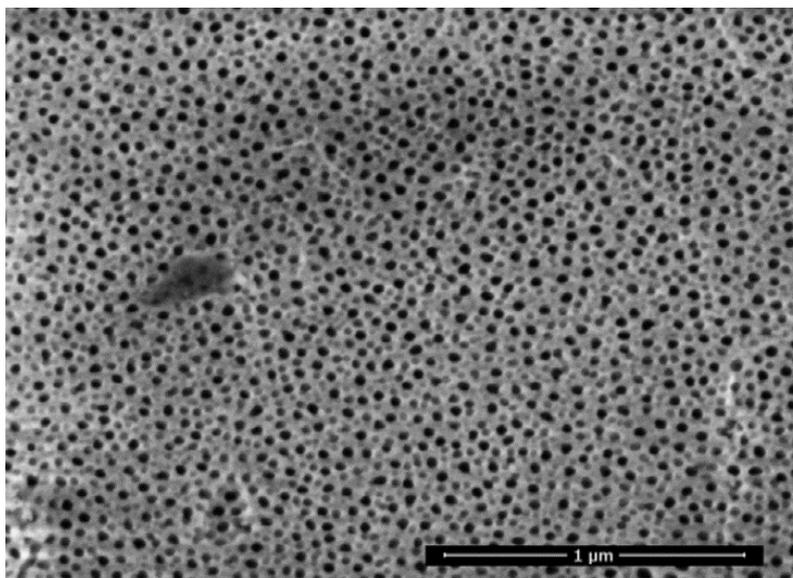


Рисунок 1.21 – РЭМ изображение анодного оксида алюминия

1.3.2 Применение АСМ для исследования анодного оксида алюминия

Структура анодного оксида алюминия имеет упорядоченную форму (поры), для ее исследования чаще применяют методы атомно-силовой микроскопии [11, 12] и растровой электронной микроскопии [13, 14].

Для количественной оценки степени упорядоченности структуры пористого АОА [15], коэффициент упорядоченности представляет собой отношение количества ячеек, расположенных в гексагональной форме относительно друг

друга, к общему количеству ячеек в выбранной области поверхности. Оценка упорядоченности на макроуровне важна, поскольку этот параметр определяет свойства и размеры рабочих областей функциональных структур на основе пористых АОА.

В работе [16] исследовались процессы управляемого формирования и саморазвития нанопористых мембран на основе оксида алюминия с упорядоченной системой пор. Была предложена методика характеристики геометрических параметров мембран основана на анализе структуры слоев пористых АОА по данным АСМ с помощью цифровых методов обработки изображений (рис. 1.23).

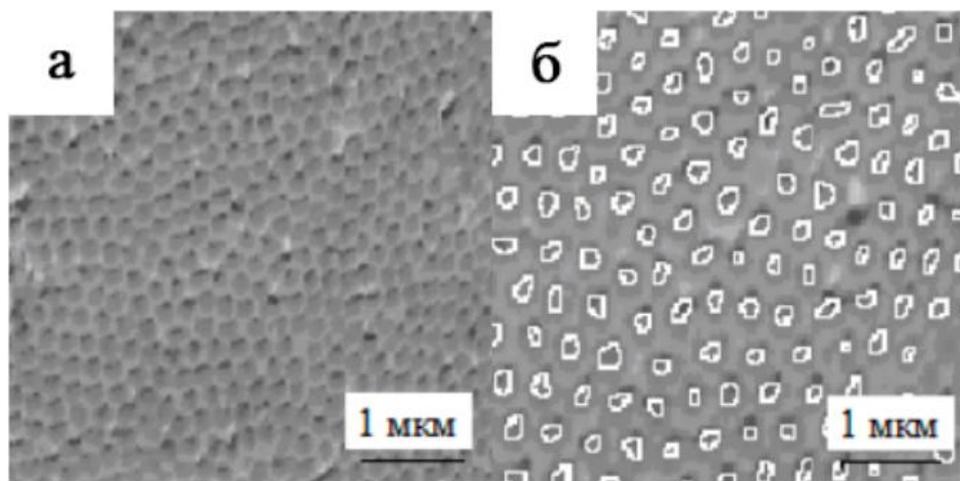


Рисунок 1.22 – Результаты работы программы по обработке изображений; атомно-силовой микроскопии а) до, б) после.

Также в работе [17] был предложен алгоритм, позволяющий проводить оценку качества сотовой структуры пористых АОА по данным РЭМ изображений поверхности, но полученное изображение (рис. 1.24) содержит некоторое количество артефактов, полученные при сканировании, которые исключить невозможно, из-за специфической работы растрового микроскопа.

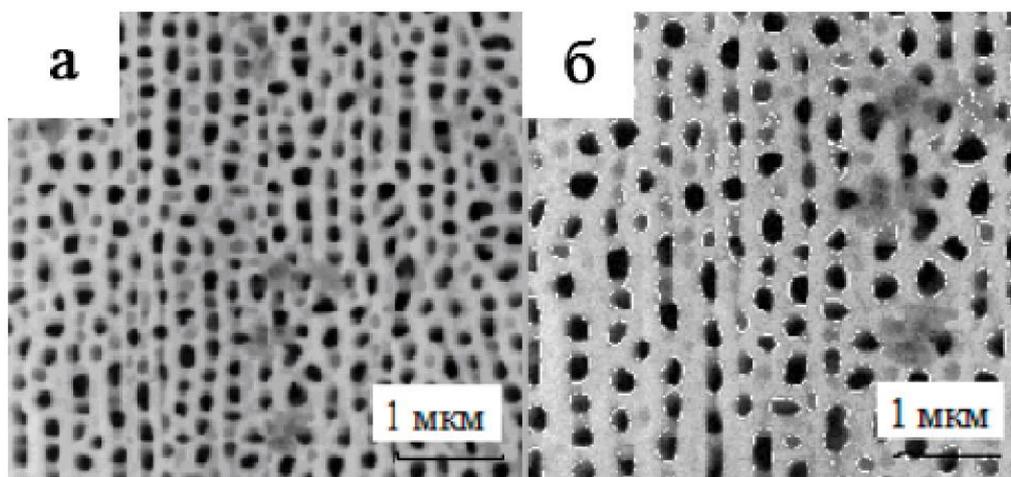


Рисунок 1.23 – Результаты работы программы по обработке изображений; растровой электронной микроскопии а) до, б) после.

Благодаря рассмотренным исследованиям, основанных на цифровых данных, следует отметить, что графические методики исследования поверхности пористых АОА сильно чувствительны к полученным изображениям, любые артефакты или дефекты при съемке образцов способствуют получению ложных данных. Поэтому важно применять средства для минимизации таких помех, к сожалению, растровая электронная микроскопия не имеет методов для таких случаев, но атомно-силовая микроскопия имеет в основании расширенные методы обработки математических и графических данных для исключения различного рода помех, полученных при сканировании. Это одно из главных преимуществ применения атомно-силовой микроскопии для изучения анодного оксида алюминия.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

2.1 ОБОРУДОВАНИЕ

2.1.1 Атомно-силовой микроскоп

В работе для исследования использовался Атомно-силовой микроскоп ИНТЕГРА Аура (рис. 2.1). АСМ состоит из нескольких компонентов:

- 1) Базовый блок микроскопа.
- 2) Измерительная головка микроскопа.
- 3) Виброизоляционный столик.
- 4) Видеокамера микроскопа.
- 5) Компьютер для программного обеспечения микроскопа.

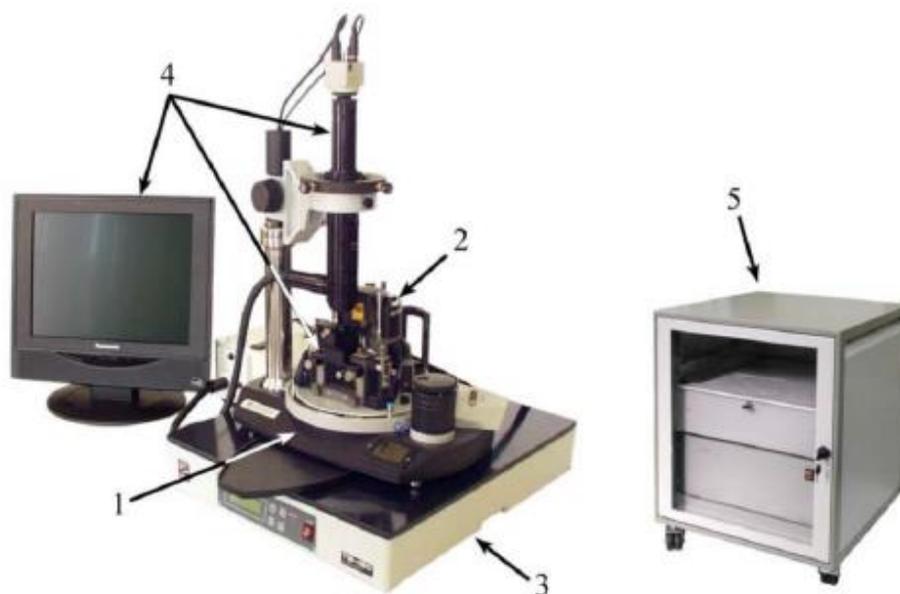


Рисунок 2.1 – Атомно-силовой микроскоп ИНТЕГРА Аура.

- 1 – Базовый блок, 2 - Измерительная головка, 3 – Система виброизоляции,
4 – Система видеонаблюдения, 5 – Система управления

АСМ может использоваться для решения разных задач, благодаря возможности смены оснований, измерительных головок, сканеров и т.д. на базовом блоке (1 на рис. 2.1).

На базовом блоке находится механизм подвода образца к зонду, для ручного подвода (2 на рис. 2.2) образца (автоматический подвод из ПО микроскопа).

На блоке установлен датчик (3 на рис. 2.2) с помощью, которого, на ЖК-дисплей (4 на рис. 2.2) вводятся данные о температуре и влажности среды. Для подачи газа и откачки воздуха используются специальные штуцеры (5 на рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Базовый блок АСМ ИНТЕГРА. 1 – Сменное основание, 2 – Ручка механизма подвода, 3 – Датчик температуры и влажности, 4 – ЖК-дисплей, 5 – Штуцеры

На базовый блок прибора устанавливается сменное основание. В данном АСМ предусмотрены несколько типов сменных оснований. В работе использовалось основание CSC01NTF (рис. 2.3).

На сменном основании находятся два типа посадочных гнезд. Измерительные головки могут устанавливаться либо в посадочные гнезда (1, 2 на рис 2.3). Для установки вспомогательных зеркал (при работе с видеонаблюдением) используются специальный стойки (3 на рис 2.3). Позиционер служит для того, чтобы в него устанавливался держатель образца, сканер или другое устройство (4 на рис 2.3).

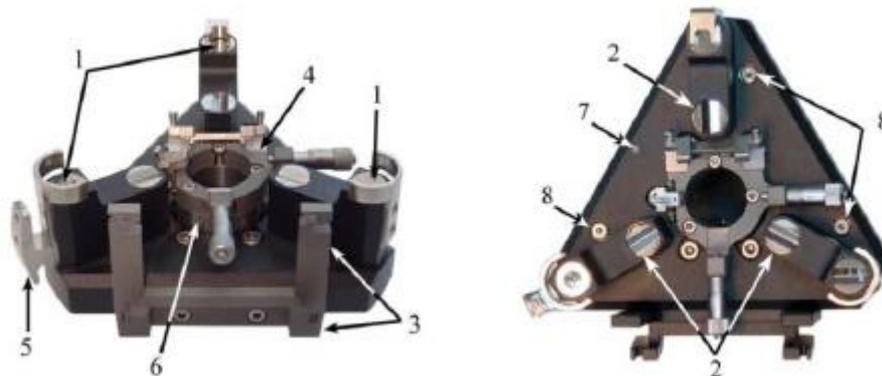


Рисунок 2.3 – Сменное основание CSC01NTF. 1, 2 – Посадочные гнезда для установки измерительных головок, 3 – Стойки для установки зеркал, 4 – Позиционер, 5 – Держатель кабелей измерительной головки, 6 – Цилиндр механизма подвода, 7 – Гнездо заземления, 8 – Винты крепления к базовому блоку

Перемещение в плоскости XY осуществляется при помощи специальных механических микрометрических винтов (1 на рис 2.4). Параллельно микрометрических винтов расположены пружинные опоры, которые фиксируют устройство с образцом в позиционере (2 на рис 2.4).

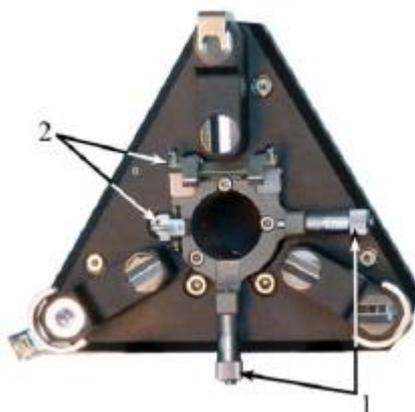


Рисунок 2.4 – Сменное основание CSC01NTF. 1 – Микрометрические винты, 2 – Пружинные опоры

В ИНТЕГРА используется несколько типов измерительных головок:

1. Универсальная измерительная головка.
2. Сканирующая измерительная головка.
3. СТМ головка.

В данном исследовании использовалась сканирующая измерительная головка (рис. 2.5). В сканирующей измерительной головке сканер закреплен в корпусе головки. За кожух головки выведен металлический наконечник, соединенный со сканером. На наконечнике установлен держатель зондового датчика (2 на рис. 2.5). Для удобства наведения лазерного луча на кантилевер в наконечнике сканера установлено специальное смотровое зеркало, через которое, можно увидеть кантилевер (3 на рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Сканирующая измерительная головка. 1 - Основание, 2 – Наконечник сканера, 3 – Держатель зондового датчика, 4 – Винты позиционирования лазера, 5 – Винты позиционирования фотодиода, 6, 7 – Винтовые опоры, 8 – Стойки

Система управления АСМ ИНТЕГРА включает:

1. АСМ контролер
2. Термоконтролер
3. Компьютер с интерфейсной платой

2.2 АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА АСМ-ДАННЫХ

2.2.1 Программное обеспечение для обработки АСМ изображений

Для обработки АСМ изображений зачастую используется программное обеспечение (ПО), которое поддерживает формат АСМ изображений, в качестве примера будет рассмотрено ПО Image Analysis.

Image Analysis не единственное программное обеспечение которое может использоваться, зачастую такие ПО, как FemtoScan Online (Центр перспективных технологий) [18], SPIP (The Scanning Probe Image Processor, Image Metrology)

[19], WSxM (Windows Scanning x Microscopy, Nanotec Electronica S.L.) [20], Gwyddion [21] очень часто используются.

Нахождение калибровочных коэффициентов по трем осям, является важным аспектом, также важно проведение коррекции деформации изображения, которая возникает из-за линейности и прочих факторов пьезосканера. Чтобы этого избежать, важно выполнить сканирование периодической структуры. Зачастую, такая структура обусловлена атомной решеткой положики.

Чтобы определить калибровочные коэффициента программы SPIP и WSxM происходит автоматическое построение двумерной сетки на изображении; в случае FemtoScan Online потребуется ручное взаимодействие, присвоение полилиний узлам; Gwyddion позволяет выполнить все в автоматическом режиме.

Фильтрация шумов является одним из важных действием в обработке АСМ изображений. Медианная фильтрация позволяет получить отличные результаты при удалении таких шумов, она имеет важное преимущество - несглаживаемость шагов. В FemtoScan Online, SPIP, Gwyddion имеется широкий выбор окон медианного фильтра. В SPIP предоставляется возможность ограничения количества изменяемых точек, это позволяет уменьшить размытость изображения. WSxM умеет автоматически удаляет точки, которые превышают сигнал средней заданной величины.

Одним из источников артефактов является наконечник кантилевера, который имеет не идеальную форму, что добавляет артефакт уширения на изображении. FemtoScan Online, SPIP и Gwyddion имеют возможность определять геометрию наконечника и реконструировать поверхность. В WSxM есть возможность только моделировать эффект уширения изображения.

Все перечисленные программные продукты позволяют выполнять полный цикл обработки данных микроскопии, корректировать, анализировать и представлять изображения. Каждая программа имеет свои сильные и слабые стороны.

FemtoScan Online предоставляет наибольшие возможности при работе с одиночными объектами в кадре. SPIP ориентирован на европейские стандарты

определения характеристик поверхностей. Gwyddion имеет самые широкие возможности построения статистических кривых.

Для работы с большими массивами однотипных данных необходимо автоматизировать их обработку, что предусмотрено в SPIP. Определенные шаги в этом направлении сделаны в программах FemtoScan Online и WSxM. Преимущество и недостаток ImageJ в том, что он ориентирован на конфокальную микроскопию, поэтому он может работать с последовательностью изображений, представляющих, например, серию секций одного объекта.

Среди рассмотренных программ следует отметить пакет FemtoScan Online, обладающий широкими возможностями для комплексной обработки, анализа и представления результатов сканирующей зондовой, электронной и оптической микроскопии. В нем реализован ряд интересных алгоритмов, среди которых расширенные объекты, выделение и статистический анализ массива объектов, набор необходимых функций для обработки изображений. Продукт имеет русифицированный и эргономичный интерфейс, что особенно важно для его реализации на отечественном рынке. Совместимость с современными операционными системами и поддержка распространенных форматов делает программный продукт универсальным. Модульная структура позволяет легко расширять его возможности без существенных изменений в основной программе.

Image Analysis был выбран для обработки АСМ изображений потому что входил в состав комплектации атомно-силового микроскопа ИНТЕГРА Аура.

2.2.2 Основные компоненты интерфейса ПО

Основными компонентами интерфейса программного модуля Image Analysis (рис. 2.6) являются:

- Контейнер изображений;
- Главное меню;
- Основная панель инструментов;
- Дерево методов, Панель настройки метода.

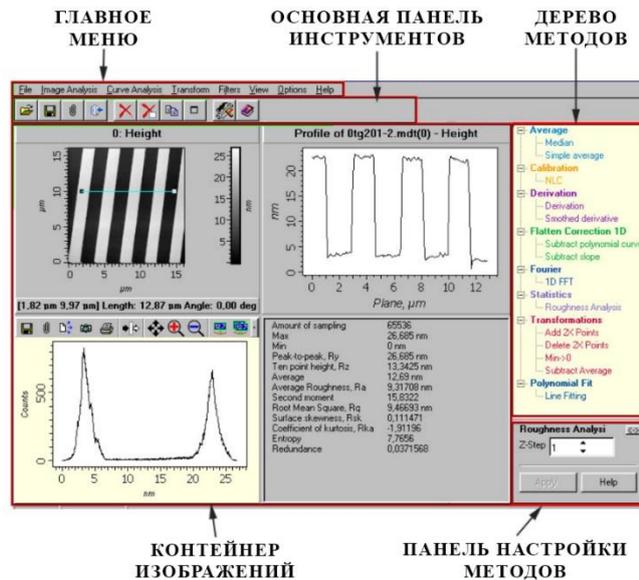


Рисунок 2.6 – Интерфейс ПО Image Analysis

2.2.3 Контейнер изображений

Контейнер изображений служит для отображения АСМ – данных:

- АСМ – изображений 2D формата;
- Различных кривых, типа профилей сечений и данных спектроскопии 1D формата;
- Различных текстовых данных.

Окно 2D – данных содержит в себе панель инструментов (рис. 2.7а и 2.7б):

- Инструменты выделения;
- Инструменты сечения;
- Инструменты масштабирования и перемещения;
- Инструменты для геометрических измерений;
- Инструменты для настройки изображения [22].

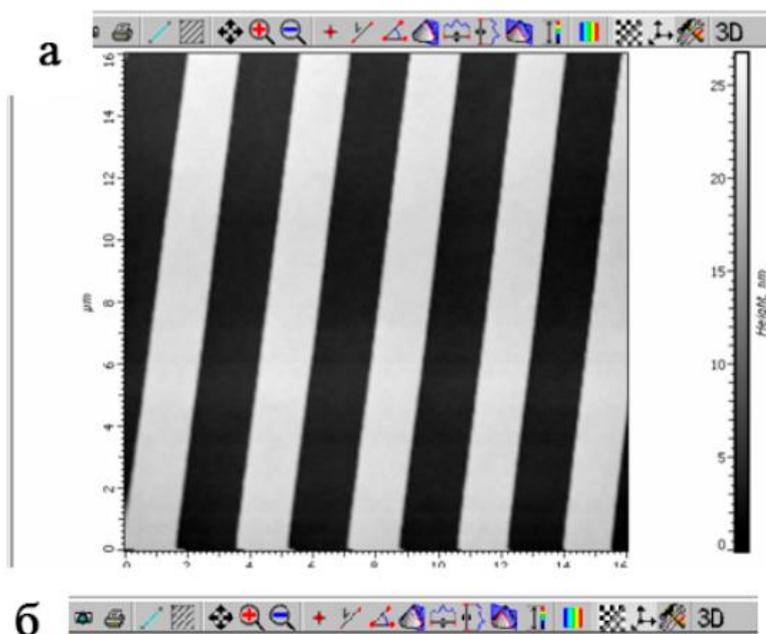


Рисунок 2.7 – а) Окно 2D – данных; б) Панель инструментов окна 2D-данных

Окно 1D – данных содержит в себе панель инструменты (рис. 2.8а и 2.8б):

- Инструменты масштабирования и перемещения изображений;
- Инструменты выделения области;
- Маркеры.

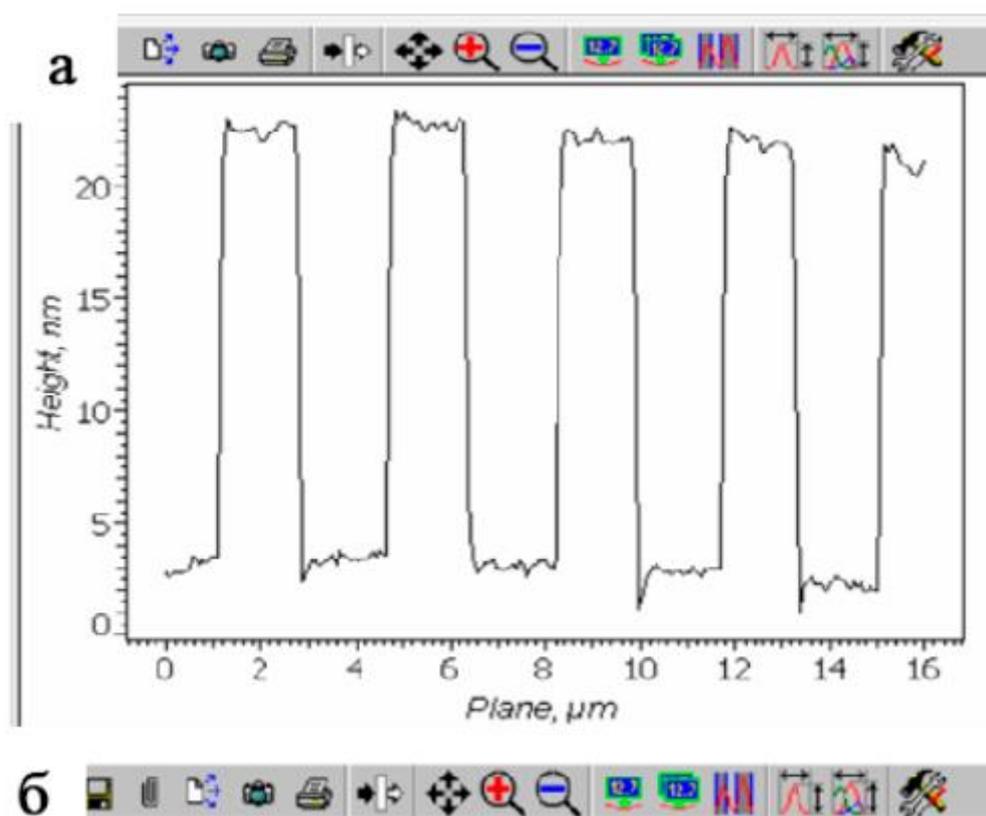


Рисунок 2.8 – а) Окно 1D – данных; б) Панель инструментов окна 1D-данных

2.2.4 Основное меню

Основное меню (рис. 2.9) служит для операции с файлами АСМ – изображений, анализа, преобразования, фильтрации 2D и 1D – данных.

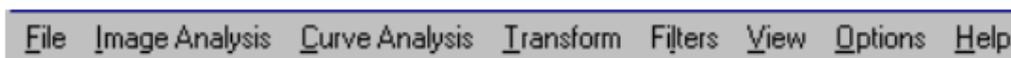


Рисунок 2.9 – Основное меню

Меню Image Analysis, Curve Analysis, Transform, Filters содержат группы методов, которые обеспечивают обработку (преобразование, фильтрацию, редактирование) и анализ АСМ – данных.

2.2.5 Дерево методов

Дерево методов (рис. 2.10) содержит список всех методов по обработке и анализу АСМ – данных, которые соответствуют активированному элементу Контейнера изображений. Если активировано Окно 2D-данных, то Дерево содержит список методов, предназначенных для анализа и обработки 2D-данных (рис. 2.10а). Соответственно, если активировано Окно 1D-данных, то Дерево содержит список методов, предназначенных для анализа и обработки 1D-данных (рис. 2.10б).



Рисунок 2.10 – Дерево методов

2.2.6 Обработка АСМ – изображений

Для обработки АСМ – изображений используются методы, предназначенные для работы двумерными функциями (2D – данными):

- Flatten Correction 2D.
- Flatten Correction 1D.
- Data transformations: Cropping; Inverse; Rotation; Left-Right; Up-Down; Add Z Points; Delete Z Points; Min Z -> 0; Min X, Y -> 0; Axis Strain-Stress.
- Editing: Fill area by Average; Fill area by Z Constant; Fill area by Zero; Fill by Superposition; Lines Filling; Columns Filling; Cut Peaks.

2.2.7 Flatten Correction 2D

Метод Flatten Correction 2D включает в себя параметры Subtract Average, Subtract Plane Subtract 2 и 3 Order surface, Three Points Leveling.

Параметр Subtract Average вычитает среднее значение исходной функции. В результате получается функция, значения которой отсчитываются от среднего значения.

Параметр Subtract Plane вычитает поверхность первого порядка (плоскость) из всего изображения (Рис. 2.11) [23].

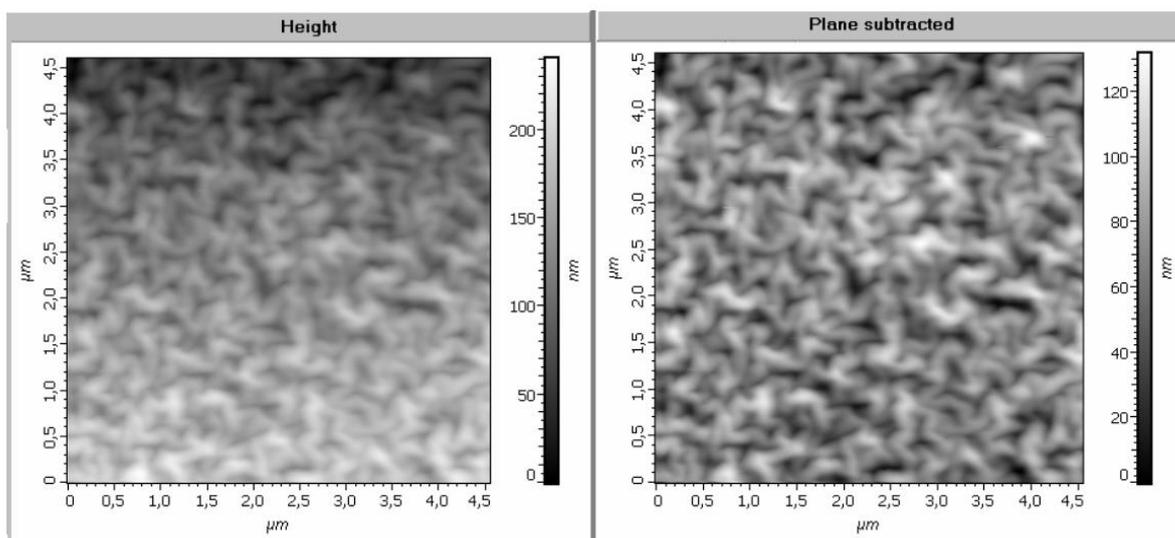


Рисунок 2.11 – Слева – исходное АСМ - изображение, имеющее некоторый наклон по оси Y, справа – АСМ - изображение после вычитания плоскости

при использовании режима Subtract Plane Include параметры плоскости определяются по выделенным областям, и далее найденная плоскость вычитается из всего изображения. Данную опцию рекомендуется применять, когда принято решение в качестве базисной выбрать плоскость, проходящую через определенные выделенные участки изображения [24].

На рисунке 2.12 слева показано АСМ-изображение объекта, имеющих явный наклон, что видно из кривой профиля сечения, показанной справа. Выделена прямоугольная область, при использовании Subtract Plane Include по этой области будут определены параметры базисной плоскости.

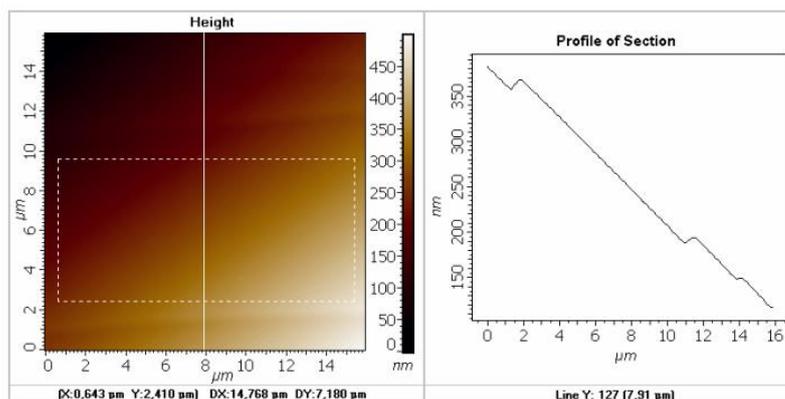


Рисунок 2.12 – Слева исходное АСМ-изображение, выделена прямоугольная область, по которой определяются параметры базисной плоскости, и показана линия сечения, демонстрирующая наклон изображения. Справа профиль сечения вдоль линии, показанной на левом рисунке

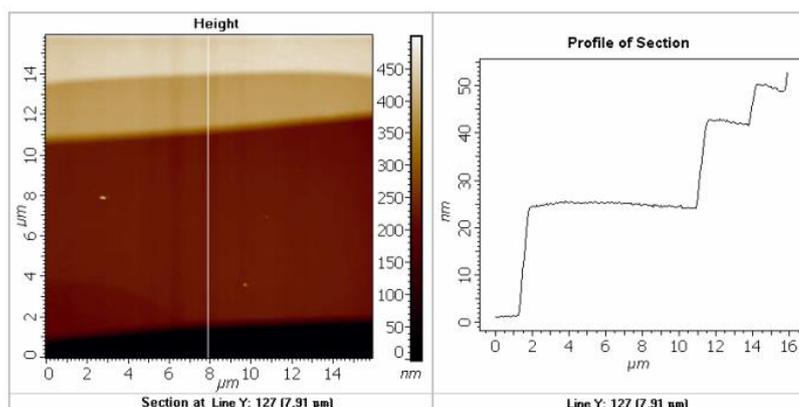


Рисунок 2.13 – Слева АСМ-изображение, после вычитания плоскости, которая определена по области, выделенной на рис. 2.12. Справа профиль сечения вдоль линии, показанной на левом рисунке

При использовании режима *Subtract Plane Exclude* параметры плоскости определяются по области изображения, исключая выделенные области, и далее, найденная плоскость вычитается из всего изображения. Данную опцию рекомендуется применять, когда исходное изображение является плоской поверхностью, причем плоские участки занимают большую часть.

На рисунке 2.14 справа показано изображение, имеющее явный наклон, что видно из кривой профиля сечения, показанной справа. Выделена прямоугольная область, которая исключается при определении средней плоскости.

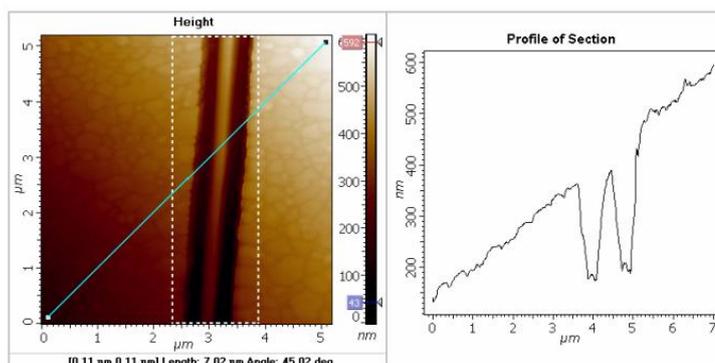


Рисунок 2.14 – Слева исходное АСМ-изображение. Справа профиль сечения вдоль линии, показанной на левом рисунке

На рисунке 2.15 слева показано АСМ-изображение, после вычитания плоскости, которая определена с исключением области (применение Subtract Plane Exclude). Справа - профиль сечения вдоль выбранной линии, показывает отсутствие наклона после выполненной процедуры вычитания [3].

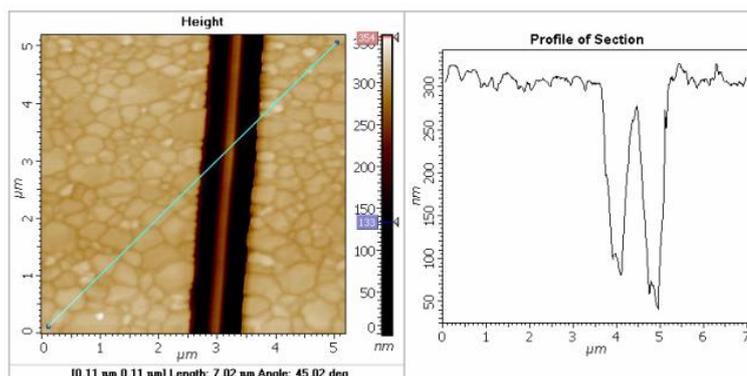


Рисунок 2.15 – Слева АСМ-изображение, после вычитания плоскости. права профиль сечения вдоль линии, показанной на левом рисунке

Параметр Subtract 2 Order surface вычитает поверхность второго порядка из всего изображения. Параметры вычитаемой поверхности определяются из данных изображения.

Параметр Subtract 3 Order surface вычитается поверхность третьего порядка из всего изображения. Параметры вычитаемой поверхности определяются из данных изображения.

Subtract 2 и 3 Order surface имеют режимы Include и Exclude. Если выбрано значение Include, то параметры поверхности определяются по выделенным областям, и далее найденная поверхность вычитается из всего изображения.

Если выбрано значение Exclude, то параметры поверхности определяются по области изображения, исключая выделенные области, и далее найденная поверхность вычитается из всего изображения.

Параметр Three Points Leveling вычитается плоскость, проходящую через три выделенные точки на изображении.

Three Points Leveling имеет 2 режима Average Value и Exact Height. Если выбран режим Average Value – в этом случае при выборе точек, для каждой из трех выделенных областей определяются координаты X, Y центральной точки, а в качестве Z – координаты (высоты) для центральной точки берется среднее значение, соответствующее выделенной области. Далее по определенным таким образом трем точкам определяются параметры плоскости, которая будет вычитаться из изображения при применении данного метода. Exact Height – в этом случае для каждой из трех выделенных областей определяются все три координаты центральной точки. Далее по этим трем точкам определяются параметры плоскости, которая будет вычитаться из изображения при применении данного метода [25].

2.2.8 Flatten Correction 1D

Метод Flatten Correction 1D включает в себя параметры Fit Lines, Fit Lines by Area, Fit by Average Poly.

Fit Lines применим для всего изображения или для выделенной области. Если на изображении отсутствуют выделенные области, то Fit Lines построчно, для каждой строки изображения находит и вычитает полином заданного порядка (рис. 2.16) [3].

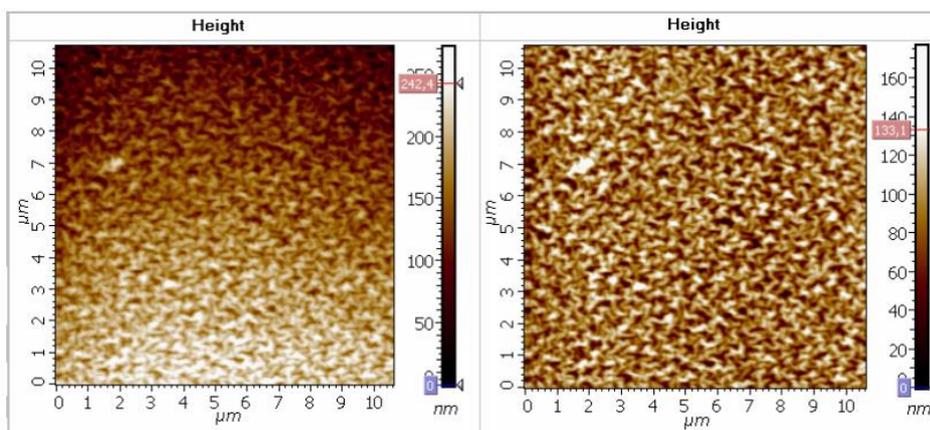


Рисунок 2.16 – Слева исходное АСМ-изображение, справа после применения Fit Lines - построчного вычитания полиномов первого порядка вдоль оси X

Fit Lines by Area применим, если имеется одна или несколько выделенных областей. У данного параметра есть 4 режима Include, Exclude, Forced Exclude и Fill.

Include - строки, которые не пересекаются с выделенной областью, никаким преобразованиям не подвергаются, если строка пересекается с выделенной областью, то для отрезков строки, принадлежащих выделенной области, определяется полином наилучшим образом, интерполирующий функцию на этих отрезках, затем этот полином вычитается из всей строки изображения.

Exclude - для строки, которая не пересекаются с выделенной областью, определяется полином наилучшим образом интерполирующий функцию и затем этот полином вычитается из строки если строка пересекается с выделенной областью, то для отрезков строки, не принадлежащих выделенной области, определяется полином наилучшим образом интерполирующий функцию на этих отрезках, затем этот полином вычитается из всей строки изображения.

Forced Exclude - для строки, которая не пересекаются с выделенной областью, определяется полином наилучшим образом интерполирующий функцию и затем этот полином вычитается из строки если строка пересекается с выделенной областью, то для отрезков строки, не принадлежащих выделенной области, определяется полином наилучшим образом интерполирующий функцию на этих отрезках, на отрезках строки не принадлежащих выделенной области из функции

производится вычитание найденного полинома, на отрезках строки принадлежащих выделенной области функция заменяется нулем.

Fill - строки, которые не пересекаются с выделенной областью, никаким преобразованиям не подвергаются, если строка пересекается с выделенной областью, то для отрезков строки, не принадлежащих выделенной области, определяется полином наилучшим образом интерполирующий функцию на этих отрезках, на отрезках строки не принадлежащих выделенной области, функция не изменяется на отрезках строки, принадлежащих выделенной области, функция заменяется полиномом [14].

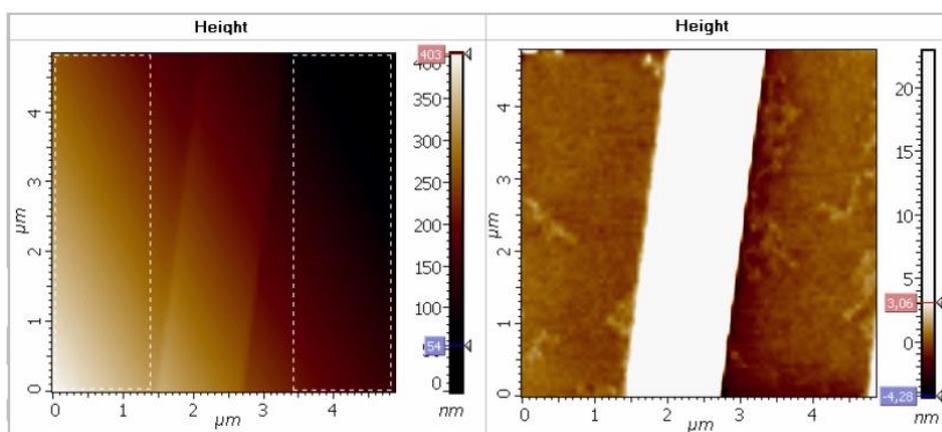


Рисунок 2.17 – Слева исходное АСМ-изображение. Справа – изображение после применения Fit Lines by Area, Include

На рисунке 2.18 слева исходное АСМ-изображение, на котором выделены области, которые исключаются при определении параметров полиномов. Справа результат применения Fit Lines by Area Exclude - построчного вычитания полиномов (в приведенном примере - полиномов первого порядка) [12].

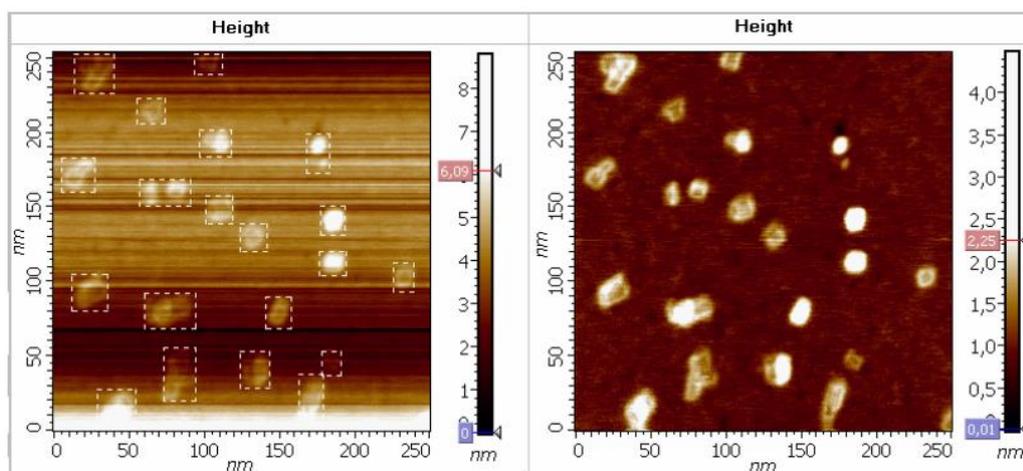


Рисунок 2.18 – Слева – исходное АСМ-изображение, справа - после применения Fit Lines by Area Exclude

Fit by Average Poly применим, если имеется одна или несколько выделенных областей. Метод производит следующие преобразования. Для каждого отрезка строки, принадлежащего выделенной области, определяется интерполяционный полином, на основе полученных полиномов определяется средний полином, и затем этот средний полином вычитается из всех строк изображения.

2.2.9 Data transformation

Группа Data transformation содержит методы, связанные с преобразованием всего массива 2D-данных, или значительной его части.

В методе Cropping вырезается выделенный фрагмент изображения и на основе его создается новый фрейм. Метод Inverse – инверсия Z координаты (темное – светлое). В методе Rotation исходное изображение поворачивается на любой заданный угол. Метод Left-Right – зеркальное отображение слева направо. Метод Up-Down - зеркальное отображение сверху вниз. Метод Up-Down - зеркальное отображение сверху вниз. В методе Add Z Points число точек исходной функции Z_{ij} увеличивается в четыре раза. В методе Delete Z Points число точек исходной функции Z_{ij} уменьшается в четыре раза. В методе Min Z-> 0 осуществляется преобразование Z – координаты: за нулевое значение Z – координаты принима-

ется Z_{\min} (минимальное значение функции). В методе $\text{Min } X, Y \rightarrow 0$ осуществляется преобразование X, Y – координат: за нулевые значение для X – координаты принимается X_{\min} , для Y - координаты Y_{\min} [14].

2.2.10 Editing

Группа Editing содержит методы, связанные с преобразованием и редактированием отдельных областей или элементов 2D-изображения.

Метод Fill area by Average применим, если имеется одна или несколько выделенных областей. В методе Fill area by Average устанавливается для Z координаты всех точек (X, Y) выделенной области значение, равное «среднему». Метод содержит 3 режима Delta, Regions, Entire Scan. Delta - расчет среднего значения по области, прилегающей к выделенной области. Regions - расчет среднего значения по выделенной области. Entire Scan – расчет среднего значения по всему изображению [14].

Fill area by Average можно применять для редактирования изображения, когда поверхность по структуре является достаточно однородной, высота значительной части поверхности примерно соответствует среднему уровню, и необходимо убрать некоторые отдельные объекты, которые значительно отличаются от остальных участков поверхности.

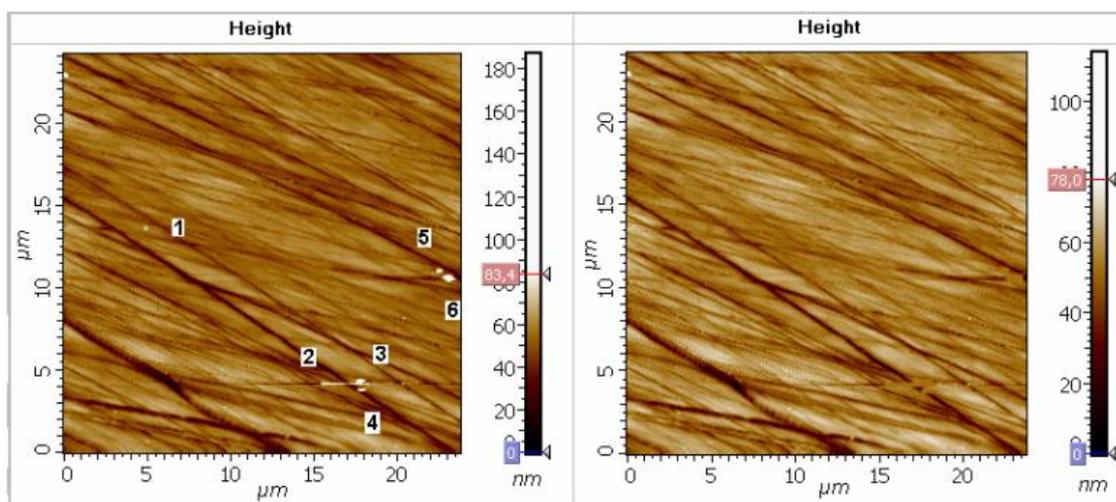


Рисунок 2.19 – Слева исходное АСМ-изображение, цифрами обозначены локальные объекты, которые были выделены прямоугольными областями (рис. 2.20). К этим областям был применен Fill area by Average – заполнение средним уровнем. Справа АСМ-изображение после применения Fill area by Average к выделенным областям (рис. 2.20)

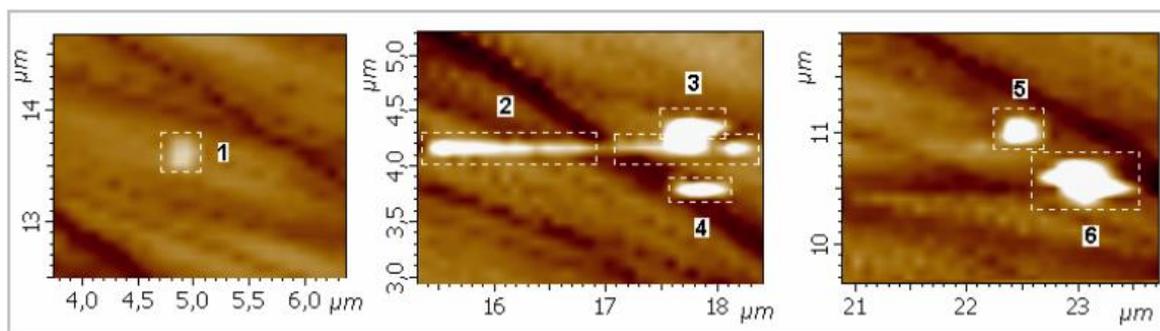


Рисунок 2.20 – Увеличенное изображение фрагментов выделенных прямоугольных областей

Метод Fill area by Z Const применим, если имеется одна или несколько выделенных областей. В методе устанавливается для Z координаты всех точек (X, Y) выделенной области значение, равное константе.

Метод Fill area by Zero применим, если имеется одна или несколько выделенных областей. В методе устанавливается значение для Z координаты всех точек (X, Y) выделенной области, равное нулю.

Метод Fill by Superposition «исправляются» отдельные фрагменты изображения. Это может быть полезно, когда необходимо отредактировать отдельные фрагменты изображения, которые, являются второстепенными, и портят результат. Метод применим, если имеется одна или несколько выделенных областей.

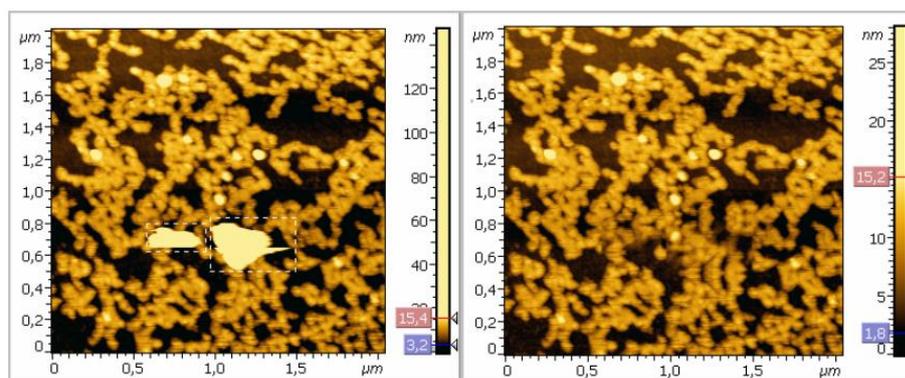


Рисунок 2.21 – Слева – исходное АСМ-изображение, справа – изображение после применения Fill by Superposition

В методе Lines Filling редактируются «линейные дефекты», расположенные горизонтально. В методе несколько расположенных рядом горизонтальных строк (от одной до четырех) заменяются суперпозицией ближайших соседних строк посредством кубической аппроксимации.

На АСМ-изображении стандартной решетки TDG 01 (рис. 2.22) имеются «линейные дефекты» (горизонтальные линии), которые требуется отредактировать.

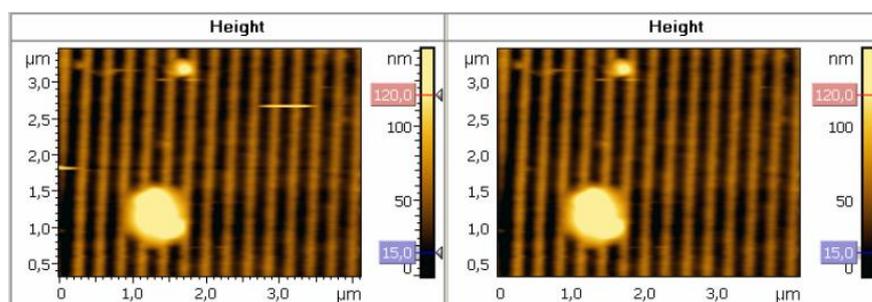


Рисунок 2.22 – Слева – исходное АСМ-изображение, справа – после последовательного применения Lines Filling для замены строк

В методе Columns Filling редактируются «линейные дефекты», расположенные вертикально. Действие данного метода аналогично методу Lines Filling. В методе несколько расположенных рядом вертикальных строк (от одной до четырех) заменяются суперпозицией ближайших соседних строк посредством кубической аппроксимации.

Процедура применения метода Columns Filling аналогична применению метода Lines Filling.

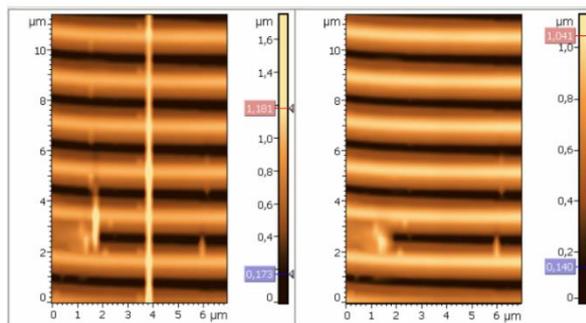


Рисунок 2.23 – Слева – исходное АСМ-изображение (фрагмент решетки TDG 01), справа – после последовательного применения Columns Filling для замены строк

В методе Cut Peaks исходная функция $Z(X, Y)$ «обрезается» сверху и снизу на заданном уровне. Данная процедура может быть полезна в случае, когда на исходном АСМ – изображении наряду с интересующим нас объектом присутствуют другие, второстепенные объекты, имеющие высоту, которая значительно превосходит высоту основного объекта. И поставлена задача - построить 3D-изображение, на котором достаточно хорошо был бы представлен именно основной объект. В этом случае, если предварительно не «убрать» или «обрезать» по высоте второстепенные объекты, то сложно получить хорошее 3D изображение основного объекта [14].

На 2D-изображении в центральной части находится основной объект – нанотрубка, имеющая высоту около 30 нм, и присутствуют второстепенные объекты, имеющие высоту более 500 нм (рис 2.24). Требуется построить 3D-изображение, на котором достаточно хорошо был бы представлен именно основной объект.

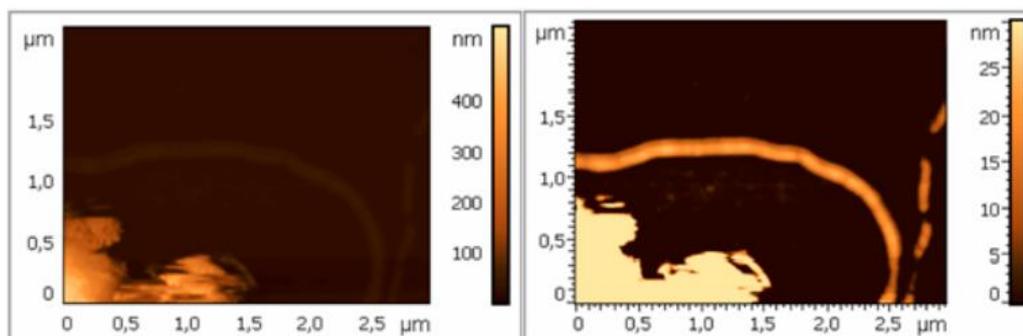


Рисунок 2.24 – Слева – Исходное 2D изображение, справа – результирующее 2D изображение

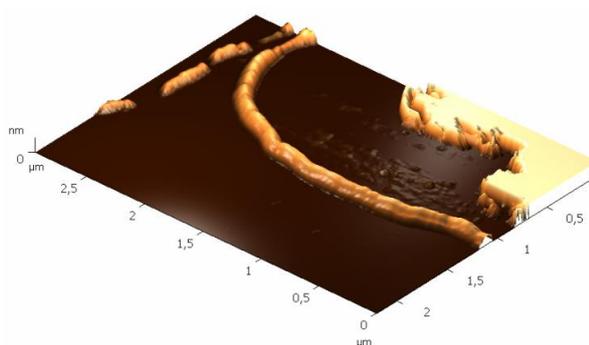


Рисунок 2.25 – 3D изображение после применения Cut Peaks

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве образца был выбран коммерческий образец АОА Anodisk 13 (Anopore) [26]. Anodisk 13 - мембраны анодного оксида алюминия, образец представляет собой диск, диаметром 13 мм, толщиной 60 мкм. Размер пор 20 нм. Дополнительная пробоподготовка не проводилась, съемка велась в воздушной среде.

На рисунке 3.1 представлено СЭМ изображение Anodisk 13. СЭМ изображение было выполнено для того, чтобы в последствии обработки АСМ изображений найти и отличить программные артефакты от дефектов структуры поверхности АОА.

ГЛАВА 4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Основная цель данного раздела – оценить перспективность развития и спланировать финансовую и коммерческую ценность конечного продукта, представленного в рамках исследовательской работы. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на следующие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, каков бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала разработки.
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Целью магистерской диссертации является применение атомно-силовой микроскопии для изучения пористого анодного оксида алюминия.

4.1 ОЦЕНКА КОММЕРЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА И ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ С ПОЗИЦИИ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

В ходе исследования было рассмотрено применение атомно-силовой микроскопии для исследования пористого анодного оксида алюминия для двух образцов разного состава:

- Анодный диск (anodisc 13);
- Анодный диск (anodisc 50).

Детальный анализ необходим, т.к. каждый образец имеет свои достоинства и недостатки. В таблице 4.1 показано сравнение исследований-конкурентов и исследования, данного НИ с точки зрения технических и экономических критериев оценки эффективности.

В ходе исследования были рассмотрены две конкурирующие работы о исследовании пористого анодного оксида алюминия (АОА):

1) Исследование АОА с помощью сканирующей электронной микроскопии

2) Исследование АОА с помощью атомно-силовой микроскопии.

Таблица 4.1 – Сравнение конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Актуальность исследования	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
2. Чистота материала	0,3	5	3	3	0,85	0,51	0,51
3. Оборудование и пробоподготовка	0,2	5	2	3	0,6	0,24	0,36
4. Простота изготовления	0,06	5	3	4	0,2	0,12	0,16
5. Эффективность	0,04	5	5	5	0,2	0,2	0,2
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Цена сырья	0,18	4	5	3	0,48	0,6	0,36
2. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	4	3	4	0,2	0,15	0,2
3. Финансирование научной разработки конкурентных товаров и разработок	0,07	5	4	4	0,35	0,28	0,28
Итого	1	38	28	30	3,38	2,4	4,47

Расчет конкурентоспособности, на примере стабильности срабатывания, определяется по формуле:

$$K = \sum B_i * B_i = 4,54$$

где K – конкурентоспособность проекта; B_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл показателя.

Проведенный анализ конкурентных технических решений показал, что исследование является наиболее актуальным и перспективным, имеет конкурентоспособность.

4.1.2 SWOT-анализ

Для исследования внешней и внутренней среды проекта, в этой работе проведен SWOT-анализ с детальной оценкой сильных и слабых сторон исследовательского проекта, а также его возможностей и угроз.

Первый этап, составляется матрица SWOT, в которую описаны слабые и сильные стороны проекта и выявленные возможности, и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Матрица SWOT-анализа

Сильные стороны	Слабые стороны
С1. Простота изготовления изделия.	Сл1. Отсутствие ссылок и материалов для соответствующих научных исследований.
С2. Высокая чистота материала	Сл2. Высокие требования к экспериментальному и исследовательскому оборудованию.
С3. Низкая стоимость оборудования и простая пробоподготовка	Сл3. Эксперименты имеют погрешности и неопределенности.
С4. Квалифицированный персонал.	Сл4. Вероятность получения брака.
Возможности	Угрозы
В1. Использование оборудования ИНШПТ ТПУ и ИФПМ СО РАН.	У1. Снижение стоимости разработок конкурентов.
В2. Появление потенциального спроса на новые разработки.	У2. Появление зарубежных аналогов и более ранний их выход на рынок.
В3. Внедрение технологии в области микроэлектроники	
В4. Внедрение на мировой рынок, экспорт за рубеж.	

На втором этапе на основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации. Соотношения параметров представлены в таблицах 4.3–4.6.

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	+	+	+
	B2	+	+	+	+
	B3	+	+	+	+
	B4	+	+	+	+

Таблица 4.4 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта					
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	B1	-	+	+	+
	B2	+	-	+	+
	B3	-	+	+	+
	B4	-	-	+	+

Таблица 4.5 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта					
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4
	У1	-	-	-	-
	У2	+	+	+	+

Таблица 4.6 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта					
------------------------	--	--	--	--	--

Угрозы про-екта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	У1	-	-	-	-
	У2	+	+	+	-

Результаты анализа представлены в итоговую таблицу 4.7.

Таблица 4.7 – Итоговая таблица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта</p> <p>С1. Простота изготовления изделия.</p> <p>С2. Высокая чистота материала</p> <p>С3. Низкая стоимость оборудования</p> <p>С4. Квалифицированный персонал.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта</p> <p>Сл1. Отсутствие ссылок и материалов для соответствующих научных исследований.</p> <p>Сл2. Высокие требования к экспериментальному и исследовательскому оборудованию.</p> <p>Сл3. Эксперименты имеют погрешности и неопределенности.</p> <p>Сл4. Вероятность получения брака.</p>
<p>Возможности</p> <p>В1. Использование оборудования ИШНПТ ТПУ и ИФПМ СО РАН.</p> <p>В2. Появление потенциального спроса на новые разработки.</p> <p>В3. Внедрение технологии в области микроэлектроники.</p> <p>В4. Внедрение на мировой рынок, экспорт за рубеж.</p>	<p>Направления развития</p> <p>В1С1С2С3С4 Оборудование ИШНПТ ТПУ и ИФПМ СО РАН позволяют изготавливать изделия по данной технологии.</p> <p>В2С1С2С3С4. Простое изготовление и малая пробоподготовка, соответствует потенциальному спросу на новые исследования.</p> <p>В3С1С2С3С4. Высокая чистота материала и простое изготовление являются хорошим основанием для внедрения технологии в области микроэлектроники.</p> <p>В4С1С2С3С4. Высокая чистота материала и простое изготовление являются основой для экспорта за рубеж и выхода на мировой рынок.</p>	<p>Сдерживающие факторы</p> <p>В1Сл2Сл3Сл4. Никакие возможности оборудования не убергут на 100% продукцию от погрешностей и неточностей.</p> <p>В2Сл1Сл3Сл4. Появлению спроса может помешать недостаточность литературных данных, высокие требования к оборудованию и погрешности в результате.</p> <p>В3Сл2Сл3Сл4. В микроэлектронике часто нужно быстрое и точное решение. Погрешности здесь неприемлемы.</p> <p>В4Сл3Сл4. Внедрение на мировой рынок требует точности экспериментов. Чем меньше погрешности, тем лучше.</p>
<p>Угрозы</p> <p>У1. Снижение стоимости разработок конкурентов.</p> <p>У2. Появление зарубежных аналогов и более ранний их выход на рынок.</p>	<p>Угрозы развития</p> <p>У2С1С2С3С4. Наши продукты обладают лучшими свойствами, являются более привлекательными мировом рынке.</p>	<p>Уязвимости:</p> <p>У2Сл1Сл2Сл3. Недостаточность литературных данных, долгая реализация вместе с исследованиями могут дать выиграть время конкурентам.</p>

В результате SWOT-анализа показано, что на преимущества разрабатываемой технологии преобладают над ее недостатками. Данные недостатки, которые на данный момент на практике не устранены, но в теории уже есть возможности

для их устранения. Результаты анализа учтены в дальнейшей научно-исследовательской разработке.

4.2 ПЛАНИРОВАНИЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса научно-исследовательских работ осуществляется в порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение количества исполнителей для каждой из работ;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок этапов работ и распределение исполнителей для данной научно-исследовательской работы, приведен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Научный руководитель
	2	Составление и утверждение плана магистерской диссертации	Инженер, научный руководитель
Выбор способа решения поставленной задачи	3	Обзор научной литературы	Инженер
	4	Выбор методов исследования	Инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Планирование эксперимента	Инженер, научный руководитель
	6	Разработка и пробоподготовка материалов	Инженер
	7	Исследование материала на атомно-силовом микроскопе	Инженер
	8	Исследование материала на сканирующем электронном микроскопе	Инженер, научный руководитель
	9	Сравнение методов	Инженер
	10	Обработка полученных данных	Инженер

Обобщение и оценка результатов	11	Оценка правильности полученных результатов	Инженер, Научный руководитель
Оформление отчета по НИР	12	Составление пояснительной записки.	Инженер

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

При проведении научных исследований основную часть стоимости разработки составляют трудовые затраты, поэтому определение трудоемкости проводимых работ является важным этапом составления бюджета.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости использована следующая формула:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{мин}i} + 2t_{\text{макс}i}}{5}, \quad (4.1)$$

где $t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, человеко-дни;

$t_{\text{мин}i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни;

$t_{\text{макс}i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни.

Зная величину ожидаемой трудоемкости, можно определить продолжительность каждой i -ой работы в рабочих днях T_{pi} , при этом учитывается параллельность выполнения работ разными исполнителями. Данный расчёт позволяет определить величину заработной платы.

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{Ч_i}, \quad (4.2)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, рабочие дни;

$t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться формулой (4.3):

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (4.3)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{кал.инж} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48 \quad (4.4)$$

где $T_{кал}$ – общее количество календарных дней в году; $T_{вых}$ – общее количество выходных дней в году; $T_{пр}$ – общее количество праздничных дней в году.

Расчеты временных показателей проведения научного исследования обобщены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ожг}$, чел-дни			
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика		1		3		1,8	1,8	3
2. Составление и утверждение плана магистерской диссертации	3	3	6	7	4,2	4,6	4,4	7
3. Обзор научной литературы	7		10		8,2		8,2	12
4. Выбор методов исследования	1		3		1,8		1,8	3
5. Планирование эксперимента	2	2	4	4	2,8	2,8	2,8	4

6. Разработка и пробо- подготовка материалов	7		9		7,8		7,8	11
7. Исследование мате- риала на атомно-сило- вом микроскопе	20		30		25,4		25,4	33
8. Исследование мате- риала на сканирующем электронном микро- скопе	7		10		8,2		8,2	12
9. Сравнение методов	6		8		6,8		6,8	10
10. Обработка получен- ных данных	8		20		16,2		16,2	20
11. Оценка правильности полученных результа- тов	4	2	6	3	4,8	2,4	3,6	5
12. Составление пояс- нительной записки	9		12		10,2		10,2	15
Итого:	74	8	118	17	96,4	11,6	97,2	135

Примечание: Исп. 1 – инженер, Исп. 2 – научный руководитель.

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения про-
екта с использованием диаграммы Ганта (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп	T_{ki} кал. дн.	Продолжительность работ												
				февр			март			апр			май			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	Составление и утвержде- ние технического зада- ния, утверждение плана- графика	Исп2	3	█												
2	Составление и утвержде- ние плана магистерской диссертации	Исп1 Исп2	7	█	█											
3	Обзор научной литера- туры	Исп1	12		█	█										
4	Выбор методов исследо- вания	Исп1	3			█										
5	Планирование экспери- мента	Исп1 Исп2	4			█	█									

№	Вид работ	Исп	T_{ki} кал. дн.	Продолжительность работ												
				февр			март			апр			май			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
6	Разработка и пробо-подготовка материалов	Исп1	11				■	■								
7	Исследование материала на атомно-силовом микроскопе	Исп1	33					■	■	■						
8	Исследование материала на сканирующем электронном микроскопе	Исп1 Исп2	12								■	■				
9	Сравнение методов	Исп1	10										■	■		
10	Обработка полученных данных	Исп1	20											■	■	
11	Оценка правильности полученных результатов	Исп1 Исп2	5												▨	
12	Составление пояснительной записки	Исп1	15												■	

Примечание:

■ – Исп. 1 (инженер), ▨ – Исп. 2 (научный руководитель)

4.3 БЮДЖЕТ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы НИР.

4.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценам или договорам поставки. Кроме того, статья включает так называемые транспортно-заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (т.н. транзакции). Приблизительно они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это 5 - 20 %. Исполнитель работы самостоятельно выбирает их величину в указанных границах. Результаты расчета затрат представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Затраты на получение образца № 1 и № 2

Наименование статей	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Итого затраты, руб.
Анодные неорганические мембраны (GE HEALTHCARE ANODISC, США)	упаковка	2	68 942	137 884
Комплекс канцелярских принадлежностей	штук	2	500	1 000
Итого:				138 884

4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации: рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (4.5)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m, \quad (4.6)$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.; m – время использования, мес.

Таблица 4.12 – Затраты на оборудование

№ п/п	Наименование Оборудования	Кол-во ед.	Срок полезного использования, лет	Время использования, мес.	H_A , %	Цена оборудования, руб.	Амортизация
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Атомно-силовой микроскоп ИНТЕГРА Аура	1	15	0,89	7	7 000 000	36 341
2	Растровый электронный микроскоп (РЭМ) JEOL JSM-7500F	1	20	0,33	5	15 000 000	20 625
Итого:							56 966 руб.

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого, необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата $Z_{осн}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{он} \cdot T_p, \quad (4.7)$$

где $Z_{он}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (таблица 4.9).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{он} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{38050 \cdot 10,3}{246} = 1593,2 \text{ руб.}, \quad (4.8)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 28 раб. дня – $M = 11,2$ месяца, 5-дневная рабочая неделя;
- при отпуске в 56 раб. дней – $M = 10,3$ месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{он} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{21611 \cdot 11,2}{213} = 1136,4 \text{ руб.} \quad (4.9)$$

Должностной оклад работника за месяц:

– для руководителя:

$$Z_m = Z_{мс} \cdot (1 + k_{np} + k_d) k_p = 19513 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 38050 \text{ руб.} \quad (4.10)$$

– для инженера:

$$Z_m = Z_{мс} \cdot (1 + k_{np} + k_d) k_p = 11083 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 21611 \text{ руб.}, \quad (4.11)$$

где $Z_{мс}$ – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.; k_{np} – премиальный коэффициент, равен 0,3; k_d – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2; k_p – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 4.13 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	52/14	104/14
- выходные дни		
- праздничные дни		
Потери рабочего времени	48/5	24/10
- отпуск		
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Таблица 4.14 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{мс}, руб$	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$Z_{м}, руб$	$Z_{дн}, руб$	$T_{р}, раб.дн.$	$Z_{осн}, руб$
Руководитель	19 513	0,3	0,2	1,3	38 050	1593,2	11,6	18481,1
Инженер	11 083	0,3	0,2	1,3	21611	1136,4	113,6	129095
Итого:								147576,1

4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 18481,1 = 2772,2 \text{ руб.} \quad (4.12)$$

– для инженера:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 129095 = 19364,3 \text{ руб.}, \quad (4.13)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,15).

4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 \cdot (18481,1 + 2772,2) = 6376 \text{ руб.} \quad (4.14)$$

– для инженера:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,3 \cdot (129095 + 19364,3) = 44537,8 \text{ руб.}, \quad (4.15)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

4.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

Величина накладных расходов определяется по формуле

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{нр}, \quad (4.16)$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,16.

4.3.7 Бюджетная стоимость НИР

Таблица 4.15 – Группировка затрат по статьям

Статьи							
1	2	3	4	5	6	7	8
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Стоимость бюджета
56 966	138 884	147 576	221 36	50 913	416 476	47 432	463 907

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется бюджет НИ «Развитие метода квазиизостатического прессования керамических порошков в изделие сложной формы применением аддитивных технологий» по форме, приведенной в таблице 4.16. В таблице также представлено определение бюджета затрат двух конкурирующих научно-исследовательских проектов.

Таблица 4.16 – Группировка затрат по статьям

№	Наименование статьи	Сумма, руб.		Примечание
		Текущий Проект	Исп.2	
1	Материальные затраты НИР	138 884	150 650	Пункт 4.2.3.1

2	Затраты на специальное оборудование	56 966	70 420	Пункт 4.2.3.2
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	147 576	147 576	Пункт 4.2.3.3
4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	22 136	22 136	Пункт 4.2.3.3
5	Отчисления во внебюджетные фонды	50 913	50 913	Пункт 4.2.3.4
6	Накладные расходы	47 432	463 77	Пункт 4.2.3.5
Бюджет затрат НИР		463 907	488 072	Сумма ст. 1- 6

Где: Исп.2 – Аналог 1

4.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСНОЙ (РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ), ФИНАНСОВОЙ, БЮДЖЕТНОЙ, СОЦИАЛЬНОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

4.4.1 Интегральный показатель финансовой эффективности

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получен в процессе оценки бюджета затрат двух вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принят за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве аналогов данной НИР рассмотрены:

1) Исследовательская работа НИ НГУ;

Интегральный финансовый показатель разработки рассчитывается как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (4.17)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения.

$\Phi_{\text{текущ.проект}} = 463907$ руб, $\Phi_{\text{исп.1}} = 488072$ руб.

$$I_{\text{финр}}^{\text{тек.пр.}} = \frac{\Phi_{\text{тек.пр.}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{463907}{488072} = 0,95;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = \frac{\Phi_{\text{исп.2}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{488072}{488072} = 1;$$

В результате расчета консолидированных финансовых показателей по двум вариантам разработки вариант 1 (текущий проект) с меньшим перевесом признан считается более приемлемым с точки зрения финансовой эффективности.

4.4.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности

Интегральный показатель вариантов выполнения НИР (I_{pi}) определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 4.17).

Таблица 4.17 – Сравнительная оценка характеристик вариантов НИР

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп.2
1. Актуальность исследования	0,18	5	5
2. Чистота материала	0,32	4	4
3. Оборудование и пробоподготовка	0,12	5	3
4. Простота изготовления	0,08	5	4
5. Эффективность	0,12	5	5
6. Предполагаемый срок эксплуатации	0,18	4	5
ИТОГО	1	4,68	4,36

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,18 \cdot 5 + 0,32 \cdot 4 + 0,12 \cdot 5 + 0,08 \cdot 5 + 0,12 \cdot 5 + 0,18 \cdot 5 = 4,68$$

$$I_{p2} = 0,18 \cdot 5 + 0,32 \cdot 4 + 0,12 \cdot 3 + 0,08 \cdot 4 + 0,12 \cdot 5 + 0,18 \cdot 5 = 4,36$$

4.4.3 Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки

Вычисляется на основании показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{р-исп.i}}{I_{финр}^{исп.i}} . \quad (20)$$

$$I_{исп.1} = \frac{4,68}{0,95} = 4,92, I_{исп.2} = \frac{4,36}{1} = 4,36$$

Далее интегральные показатели эффективности каждого варианта НИР сравнивались с интегральными показателями эффективности других вариантов с целью определения сравнительной эффективности проекта (таблица 4.18).

Таблица 4.18 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,95	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,68	4,36
3	Интегральный показатель эффективности	4,92	4,36
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,84

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансово- и ресурсоэффективным является вариант 1 (текущий проект). Наш проект является более эффективным по сравнению с конкурентами.

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ

В результате выполнения целей раздела можно сделать следующие выводы:

1. Результатом анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации НИР как наиболее подходящего и оптимального по сравнению с другими.

2. В ходе планирования для руководителя и инженера был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей. Определено следующее: общее количество календарных дней для выполнения работ составляет 135 дней; общее количество рабочих дней, в течение которых работал инженер, составляет 130 дней; общее количество дней, в течение которых работал руководитель, составляет 31 дней;

3. Для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет 463 907 руб;

4. Результат оценки эффективности ИР показывает следующие выводы:

1) значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,95, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной по сравнению с аналогами;

2) значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,68, по сравнению с 4,36;

3) значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 4,92, по сравнению с 4,36, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Гришанков А.А., Пань Мэнхуа, Цзи Синьюй. Анализ и обработка АСМ-изображений анодного оксида алюминия / Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 27-30 апреля 2021 г. Т. 1: Физика. – Томск, 2021. – Изд-во ТУСУР, 2021. – Т. 1.
2. Гришанков А.А., Воронова Г.А. Анализ и обработка изображений анодного оксида алюминия, полученных методом атомно-силовой микроскопии / Вестн. Том. гос. ун-та. Химия. 2020. № 19. С. 27–32.