

**На правах рукописи**

**Карташев Всеволод Владимирович**

**АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ  
ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСОВ  
ДЛЯ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

**Специальность: 05.13.11 –**

**Математическое и программное обеспечение  
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**Москва – 2010**

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук, профессор  
**Платонов Александр Константинович**

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук  
**Лазутин Юрий Михайлович**

кандидат физико-математических наук  
**Колесов Владимир Владимирович**

**Ведущая организация:**

Российский химико-технологический  
университет им. Д.И. Менделеева

Защита состоится «07» декабря 2010 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 002.024.01 при Институте прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, расположенном по адресу: 125047, Москва, Миусская пл., 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН.

Автореферат разослан «05» ноября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук



Т.А. Полилова

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы**

В диссертации на примере программного комплекса для обработки данных сканирования туннельного микроскопа предлагаются методы решения проблем, которые возникают при создании программных средств визуализации результатов исследований в нанотехнологии. Экстремально малые размеры объектов, которыми оперируют нанотехнологии, делают крайне затруднительной визуализацию объектов и процессов, протекающих с их участием. Следствием этого является проблема соответствия картины измеренного и реального состояний объекта на наноизмерениях.

Интенсивное развитие туннельной микроскопии связано с успехами электроники, которые в 90-х годах сделали устройства зондовой нано- и микроскопии доступными для широкого применения. В настоящее время парк приборов, обеспечивающих измерение геометрии нано- или микрорельефа в поле зрения микроскопа, составляет тысячи единиц и продолжает быстро увеличиваться. При этом наиболее принятым способом показа и запоминания результатов зондовой микроскопии является двумерное графическое изображение оцифрованных измерений высот, получаемых в процессе построения сканирования изучаемого объекта зондом микроскопа.

В связи с крайней молодостью метода зондовой микроскопии, значительная часть проблем, лежащих в его основе, исследована еще не настолько глубоко, чтобы гарантировать однозначность интерпретации получаемых изображений траекторий движения зонда микроскопа, имеющего нанометровые размеры. Это диктует необходимость развития алгоритмов преобразований, которые можно применить к данным сканирования, с целью более глубокого исследования физико-химических и квантовых проблем. Требуемое расширение состава алгоритмов преобразования графического изображения сигнала туннельного микроскопа в свою очередь определяет важность разработки программных средств, обеспечивающих этот процесс.

Актуальность решения этой задачи определяется следующими обстоятельствами. (1) Существующие ныне программные средства для преобразований сиг-

налов туннельного микроскопа реализуют лишь линейную схему обработки данных, которая сводится к применению к обрабатываемым изображениям простых преобразований (функций, фильтров) в задаваемой пользователем последовательности. (2) Одним из свойств программных средств, спроектированных по традиционным технологиям, является их закрытость – неприспособленность к модификации фильтрующих функций и параметров моделей самим пользователем. Это серьезно ограничивает процесс совершенствования и развития способов и результатов обработки данных, так как в нанотехнологиях большинство приборов, построенных по новым технологиям, как правило, используется именно для исследовательских целей.

В связи с тем, что стандартные графические средства обработки изображений не учитывают особенности процесса функционирования микроскопа, при их применении следует принимать во внимание возможность появления артефактов. В случае туннельной микроскопии это связано с отсутствием априорного знания геометрии взаимодействующих объектов ввиду экстремальной малости и упомянутого большого различия их размеров. Важным фактором задачи обработки изображения сигнала является учёт влияния размеров и формы иглы зондового микроскопа в процессе её взаимодействия со сканируемым рельефом. Эта задача не может быть решена чисто вычислительными методами в виду ее сложности, что делает необходимым развитие программных методов с более углубленной обработкой данных, опирающейся на сложные физические модели процесса зондовой микроскопии.

Требуемое создание программных комплексов обработки данных с учетом обстоятельств процесса измерения приводит к новым моделям программного обеспечения, которые обеспечивают обработку комплексных данных, включающих не только измерения, но и параметры процесса, при котором они были получены. При этом, в зависимости от условий, процесс измерений может описываться разными физическими моделями, что приводит к появлению второго потока данных (помимо измерений), требующего настройки параметров моделей с тем, чтобы привести их в соответствие с измерениями.

Очевидно, что описанная ситуация будет усугубляться с требуемым переходом к более углубленной обработке данных с использованием сложных физических моделей. Решение проблемы лежит на пути проектирования программных комплексов с использованием технологии заменяемых модулей по образцу технологии открытых систем.

**Целью диссертационной работы** является разработка метода создания открытых программных комплексов обработки данных, получаемых при зондовом сканировании рельефа поверхности.

### **Основные задачи работы:**

1. Разработка программного комплекса обработки измерений рельефа поверхности с учетом геометрии острия иглы зонда туннельного микроскопа.
2. Обобщение полученного опыта разработки в виде программной модели интерпретации данных зондовой микроскопии с учётом обстоятельств процесса сканирования рельефа исследуемой поверхности.
3. Разработка методов проектирования программных средств, которые обеспечивают возможность совершенствования или изменения геометрической модели результатов измерений зондовой микроскопии и типа зондового микроскопа.

### **Научная новизна полученных результатов**

В диссертационной работе предложена новая программная модель интерактивной непараметрической обработки данных сканирования, новизна которой заключается в многокритериальной системе оценки получаемых результатов.

Впервые рассмотрена проблема проектирования нанотехнологического программного комплекса с использованием технологии заменяемых модулей с учетом ограничений на сложность и трудоемкость разработки.

Предложен новый метод определения рельефа поверхности образца, заключающийся в использовании свойств процесса сканирования и интерактивном определении формы и размеров острия иглы туннельного микроскопа.

## **Практическая значимость полученных результатов**

Разработанный программный комплекс успешно использовался в исследованиях рельефа поверхности различных металлов с помощью туннельного микроскопа, проводившихся в РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Предложенный метод и программная реализация способа улучшения интерпретации изображения сигнала с учетом геометрии острия иглы имеют важное значение в туннельной микроскопии.

Практическую ценность представляет реализация комплекса на технологии заменяемых модулей, что позволяет сократить время разработки новых программных комплексов при уточнении физической модели взаимодействия иглы, измеряемой поверхности или типа зондового микроскопа как в контактной, так и бесконтактной модах измерения.

## **Апробация диссертации**

Результаты работы доложены и обсуждались на международных конференциях «Российские технологии для индустрии. Нанотехнологии в электронике, энергетике, экологии»-2007, НАНОФОРУМ-2009, НАНОФОРУМ-2010 и на семинарах в Институте радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и МГУ им. М.В. Ломоносова.

## **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 9 работ (4 соответствуют списку ВАК).

## **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Модель программного обеспечения для интерактивной непараметрической обработки данных сканирования путем решения уравнения физической модели.
2. Способы разработки комплексов для зондовой микроскопии с использованием методов модификации программного кода модулей с ограничениями на сложность и трудоемкость разработки.
3. Алгоритм определения геометрии острия иглы зондового микроскопа.

## **Объем и структура диссертации**

Диссертация включает Введение, 4 главы и Заключение. Список цитируемой литературы содержит 50 позиций.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен обзор наиболее распространенных программных продуктов для интерпретации измерений рельефа поверхности зондового микроскопа. Выполненное сравнение позволяет сделать вывод о том, что их функциональные возможности в целом совпадают. Рассмотренные программные комплексы содержат модули первичной обработки измерений, которые позволяют уменьшить уровень шумов, модули двумерной и трехмерной визуализации измерений, модули преобразования изображений, которые улучшают видимость деталей рельефа, и модули структурного и количественного анализа формы рельефа поверхности.

Все известные программные комплексы также используют схожие программные модели. Они построены в виде монитора пользовательских заданий на обработку массивов данных с измерениями. Задание представляет собой команду, определяемую пунктом оконного меню, который фиксирует способы в последовательности преобразований данных: вызов и сохранение файла с данными, применение фильтров и функций к данным, отображение на дисплее в соответствии с указанными пользователем параметрами и т.д.

Программная модель комплексов позволяет вести обработку данных в той последовательности, которая удобна пользователю. Это оказалось возможным благодаря тому, что каждая команда реализует применение к имеющимся данным функции из фиксированного набора, результат применения которой может быть оценен пользователем визуально. Участие пользователя в настройке преобразования состоит в задании его параметров, которое выполняется с помощью оконных органов управления. Таким образом, если данные, которые получаются после выполнения  $i$ -той команды, обозначить через  $R_i$ , функцию преобразования данных – через  $F_i$ , то для всех  $i$  можно рекурсивно записать:  $R_i = F_i(R_{i-1}, P_i)$ , где  $P_i$  – множество параметров преобразования данных на шаге  $i$ .

Отдавая должное простоте реализации и наглядности управления преобразованием данных, следует заметить, что в эту модель не укладывается класс способов обработки данных, в которых результат не может быть получен в виде явного решения уравнения взаимодействия иглы зондового микроскопа с объектом из-

мерения. К ним относятся случаи, когда геометрия острия иглы неизвестна, либо физические условия взаимодействия могут изменяться в процессе измерения, например, на поверхности допускается наличие влаги, адсорбата, либо учитываются особенности работы пьезоприводов движения иглы.

Приближенное решение этих задач может быть получено с использованием более сложной программной модели, которая обеспечивает обработку данных сканирования (путем решения уравнений взаимодействия иглы зонда и поверхности образца) и включает интерактивную обработку данных с визуальной оценкой полученного решения и с использованием различных критериев соответствия изображения физическим условиям эксперимента. Необходимым условием того, чтобы реальная поверхность исследуемого образца (далее – "подложки") совпадала с измеряемой, является пренебрежимо малый диаметр конца сканирующей иглы. На практике, её острие имеет конечные размеры в несколько долей микрометров, поэтому получить реальное изображение нанорельефа поверхности подложки можно лишь с учётом формы острия иглы зонда.

Учет формы иглы позволяет достичь одновременно две цели:

- увеличить разрешающую способность зондового микроскопа;
- получить истинные соотношения взаимных размеров наблюдаемых объектов в поле зрения.

В атомно-силовой микроскопии эта задача решена в предположении, что геометрия иглы известна. Форму и размеры острия субмикронного размера определяют с помощью калибровочной поверхности. Для иглы с острием нанометрового размера эти способы не применимы ввиду того, что современные технологии не позволяют создавать на поверхности подложки элементы с характерным размером менее 30 нанометров. Основным выводом этой главы является необходимость обогащения программных средств обработки изображений зондовой микроскопии нелинейными интерактивными алгоритмами учёта влияния формы острия иглы зонда на процесс формирования изображения.

**Вторая глава** диссертации посвящена описанию алгоритма определения геометрии острия иглы. Предполагается, что известны измерения рельефа поверх-



ности подложки, выполненные с помощью сканирующей иглы, и параметры сканирования, которые позволяют с помощью существующих моделей туннельного тока вычислить величину туннельного зазора.

Если предположить, что геометрия острия иглы известна, то рельеф сканируемой поверхности можно определить с помощью геометрических вычислений, использующих данные сканирования. Обозначим через  $M(G,P)$  модель рельефа поверхности, которая получается из данных сканирования при условии, что острие иглы имеет геометрию  $G$ , а  $P$  – параметры сканирования. Форма и размеры острия иглы и рельеф поверхности должны быть такими, чтобы в совокупности выполнялись условия сканирования:

$$\forall m (m=1, \dots, M) U_m (G, M(G, P), P, t) = true, \quad (1)$$

где  $U_m$  – одно из  $M$  условий сканирования,  $t$  – текущее время. В качестве условий сканирования  $U_m$  могут быть выбраны, например, совпадение измеренных и модельных значений физических параметров, выполнение критериев, которые описывают геометрию объектов на поверхности, и условия, которые характеризуют траекторию движения зонда. Приближенное решение этих уравнений можно получить, выбирая форму и размеры острия зонда, минимизирующие количество точек, в которых нарушается соотношение (1). Реализация такого способа ведет к необходимости перебора различных моделей геометрии острия иглы, настройке их параметров и оценке векторов невязок при всех  $t$ .

В предложенной модели алгоритмов программных средств туннельной микроскопии рельеф исследуемой поверхности  $M(G)$  следует определять путем вычисления поверхности пространственной фигуры, которая является объединением геометрии всех получаемых в процессе сканирования "туннельных оболочек" (предложенное в диссертации понятие) выбранной формы иглы  $G$ :

$$M(G) = \bigcup_{i=1}^N \bigcup_{j=1}^K M_{ij}(G).$$

Здесь  $i=1, \dots, N$  – номер строки сканирования,  $j=1, \dots, K$  номер точки в строке, в которой проводилось измерение, а  $M_{ij}(G)$  – вычисляемая в точке измерения с индексами  $i$  и  $j$  туннельная оболочка иглы формы  $G$  (расширение последней на величину туннельного зазора при измеренной величине туннельного тока).

При решении любого одного уравнения из системы уравнений (1), из имеющихся моделей  $G$  формы иглы надо выбирать такую, для которой в наибольшем числе узлов  $k$  сетки измерений выполняется неравенство

$$\rho (M_k(G), M(G)) \leq \varepsilon, \quad (2)$$

где  $\rho (M_k(G), M(G))$  – расстояние от туннельной оболочки  $k$ -й точки до поверхности рельефа  $M(G)$ , а  $\varepsilon$  - параметр алгоритма. Выполнение неравенства (2) означает, что во всех контрольных точках условия взаимодействия зонда с поверхностью наилучшим образом соответствуют модели физических параметров сканирования, записанным в процессе измерения рельефа.

Критерий выполнения условий сканирования в каждом узле  $(i, j)$  измерения является локальным критерием, так как для его проверки не требуется знать геометрию всей области сканирования. Проверка локального критерия может быть выполнена сразу после вычисления очередной точки моделируемого рельефа поверхности  $M(G)$ .

Дополнительно к локальным критериям, могут быть предложены и глобальные критерии выполнения условий сканирования, которые учитывают особенности строения всего рельефа. Для проверки этих критериев должны быть вычислены все точки модели рельефа  $M(G)$  и построены двумерная или трехмерная модели поверхности. Следовательно, проверка локальных и глобальных критериев выполнимости условий сканирования должна осуществляться в разных частях программной модели. Заметим, что в описываемом методе интерпретации сигнала туннельного микроскопа качество найденного решения фактически определяется не точностью получаемого результата обработки измерений (которая неизвестна и принципиально не может быть определена формальным способом), а предложенным способом количественной оценки степени выполнения физических условий процесса сканирования.

Для разных уравнений системы (1) их приближенные решения могут приводить к противоречивым результатам. Это существенно ограничивает возможности автоматизма программных средств и фактически делает необходимой интерактивную обработку данных с многокритериальным выбором решения (по числу усло-

вий  $U$ ). В связи с этим потребовалась разработка программной модели именно интерактивной реализации описанного выше метода непараметрической обработки данных сканирования. Важно отметить, что построенная модель программного комплекса (она описывается в следующей главе) может применяться для широкого класса задач нанотехнологии. Например, изменение модели физики взаимодействия иглы и сканируемой поверхности позволяет в рамках той же модели искать форму острия иглы в атомно-силовой микроскопии (как в контактном, так и бесконтактном режимах сканирования).

В третьей главе диссертации дается обоснование решений, использованных при построении на принципах расширяемой архитектуры программного комплекса для обработки данных на основе описанного выше алгоритма. Модель процессов обработки измерений представлена на рис. 1.

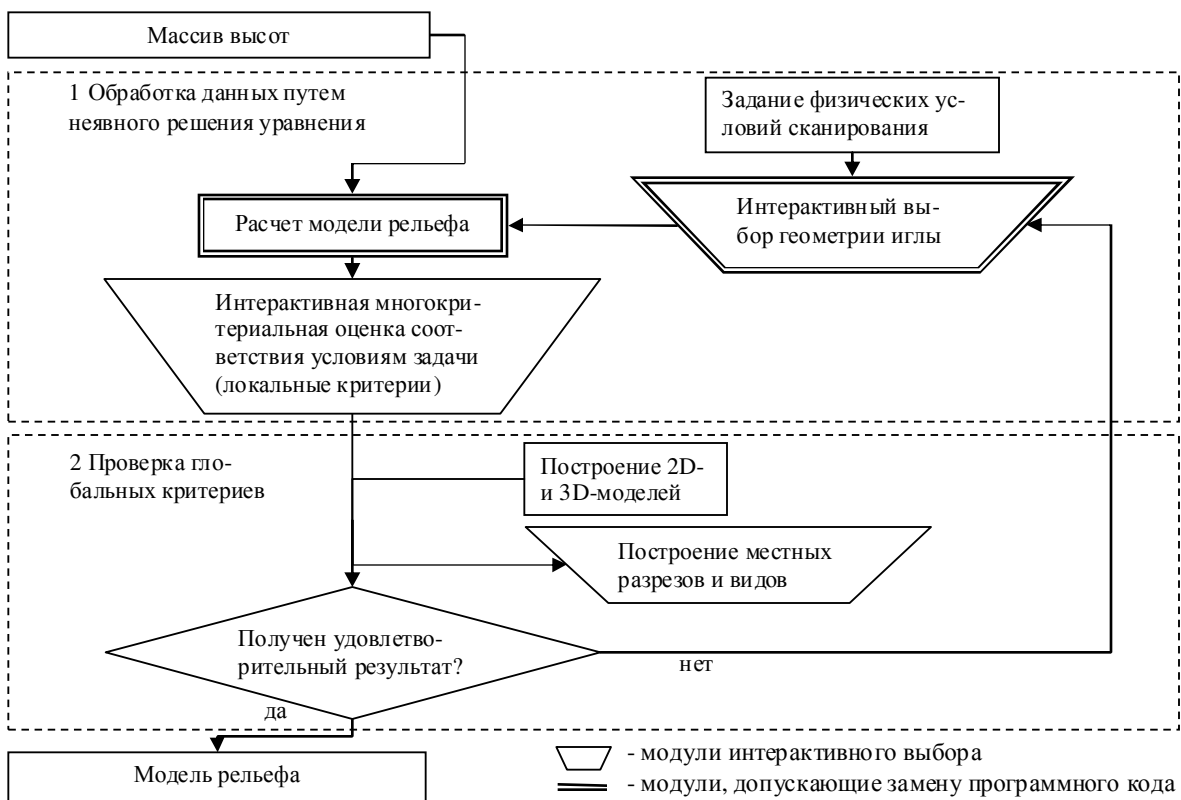


Рис. 1. Модель процессов обработки данных сканирования.

Модуль 1 содержит требуемые средства для интерактивной обработки данных, реализующие предлагаемый способ решения уравнений (1) и (2). Решение ищется пользователем путём интерактивного перебора заранее заданных моделей геометрии формы острия иглы и многокритериальных условий сравнения измере-

ний и параметров процесса сканирования. Важнейшим критерием является наличие постоянного контакта туннельной оболочки и поверхности.

Наличие блоков интерактивной обработки данных делает невозможным сведение описанной модели к описанной в первой главе традиционной модели программ обработки данных зондовой микроскопии, основанной только на функциональных преобразованиях. Конечно, очевидное преимущество функционального метода состоит в объективности получаемого решения. Но как в исследовательских задачах, так и в задачах, требующих точной настройки, это преимущество часто оказывается недостатком, так как в известной мере любое решение является приближенным и приводит к артефактам. Однозначность функционального подхода не позволяет пользователю оценить, что в получаемом результате является объективным свойством, а что – артефактом, связанным с методом. Вариабельность предлагаемого интерактивного метода делает возможным для пользователя исследование этого вопроса.

Модуль 2 содержит средства для построения трехмерной модели рельефа, позволяющие пользователю оценить в целом построенную им картину рельефа. Модуль позволяет реализовать построение двумерных местных разрезов рельефа и видов под заданным углом выбранной в интерактивном режиме части изображения рельефа поверхности. Эти средства позволяют проверять отсутствие геометрических искажений в полученном изображении. Если физические условия выполнены, то это означает, что выбранные характеристики острия иглы могут быть приняты в качестве модели иглы, с помощью которой осуществлялось сканирование. При этом модель рельефа поверхности может быть принята в качестве поверхности, которая сканировалась.

Заметим, что предлагаемая модель обработки данных зондовой микроскопии имеет много общего с известными моделями графических редакторов. Например, в программах Adobe Photoshop или Paint выбор инструмента также осуществляется пользователем посредством интерактивной процедуры. В них также имеются средства для оценки результата преобразований. Отличие описываемой модели состоит в том, что в графических редакторах субъективная оценка изображения делается на основании только глобальных критериев (уровня яркости, цветовой

гаммы изображения и др.), т.е. отсутствует предлагаемый интерактивный контур многокритериальной оценки соответствия результатов моделирования и измерений с использованием множества локальных критериев.

Далее во втором параграфе главы описывается компонентная модель программного комплекса, допускающая модификацию программного кода. При проектировании комплекса учитывались следующие требования к реализации:

1. Использование принципов объектно-ориентированного программирования при построении программных модулей.
2. Возможность замены модуля, реализующего вычисления по физической модели.
3. Разработка технологии замены модуля с использованием современных средств разработки, которая реализуема при ограничениях на трудоемкость и квалификацию пользователя.
4. Использование особенности обработки данных с целью реализации многопоточной обработки.

Технология заменяемых модулей составляет основу технологии открытых систем. Эта технология состоит в применении объектно-ориентированного подхода для создания программных модулей и обеспечении доступности пользователю их спецификаций.

Для того чтобы уменьшить трудоемкость преобразования программы к требуемому виду, в диссертации предлагается использовать принципы открытых систем лишь частично, например, только для модулей, которые обеспечивают учет физики взаимодействия объектов зондовой микроскопии. Реализация такого предложения значительно увеличивает надёжность программных комплексов, в которых помимо расчетов с использованием незаконченной физической модели, сохранились развитые стандартные средства визуализации результатов расчетов.

На рис. 2 представлена схема соответствующих компонент программного комплекса и взаимосвязь между ними. Класс *Монитор заданий пользователя* реализуется в виде стандартного оконного меню. Он позволяет пользователю выбирать порядок обработки данных. Класс *Индикация прогресса* обеспечивает контроль пользователя за ходом обработки. Группа компонент *Ввод файла* содержит

функции определения типа считываемого файла, преобразования его во внутренний формат, а также функцию импортирования, при которой отсутствующая в графическом представлении информация дополняется пользователем.

На выходе функции преобразования во внутренний формат получается совокупность высот в точках измерения (каркас рельефа). Внутреннее представление включает в себя историю изменений моделируемого рельефа, его название и метаданные.

Функция *Первичная обработка* выполняет сглаживание поступивших измерений по столбцам, обеспечивая уменьшение уровня шумов.

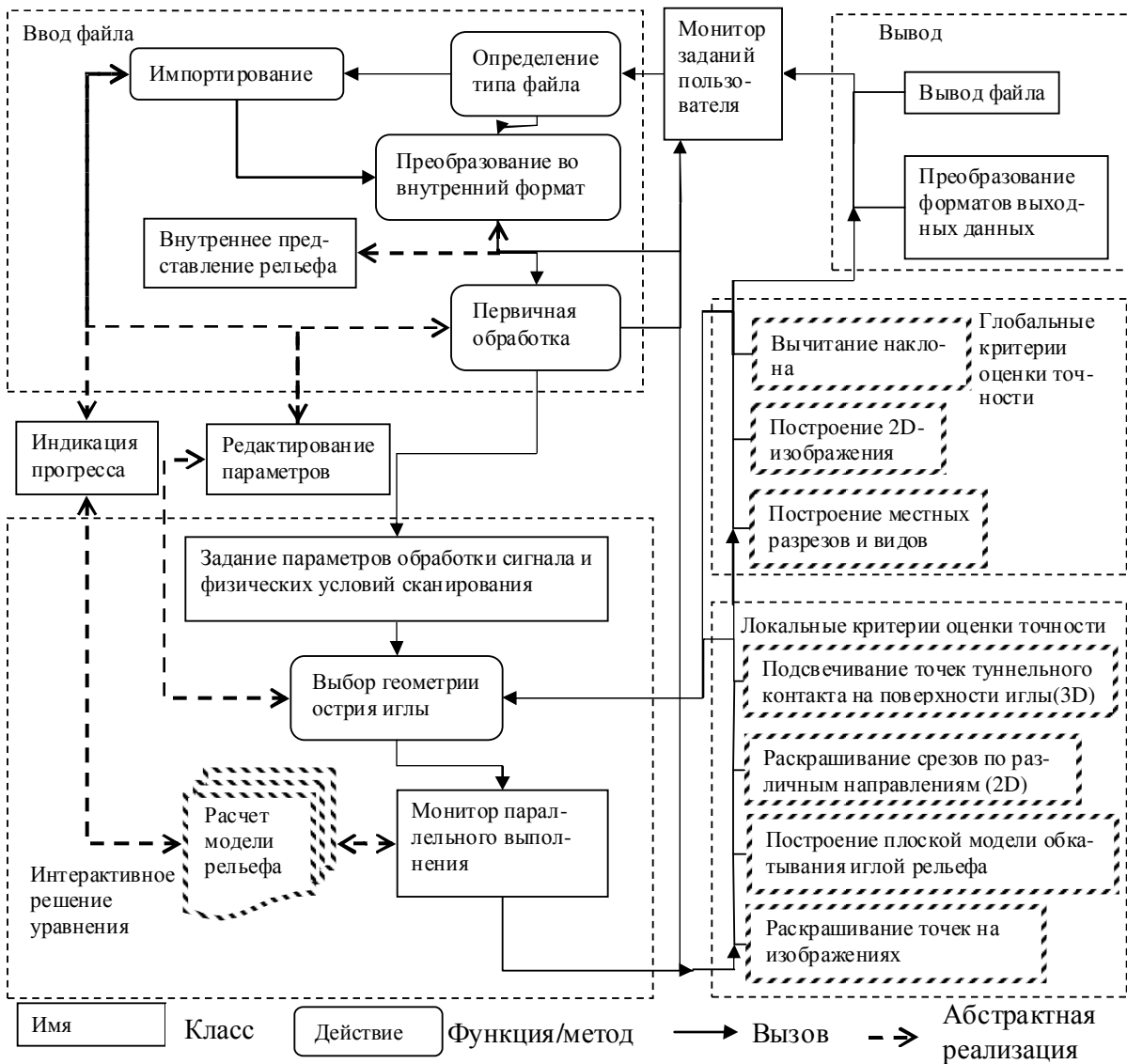


Рис. 2. Схема компонентов программного комплекса.

Группа компонент *Интерактивное решение уравнения* обеспечивает обработку данных путем решения уравнения подбором геометрии острия иглы. Класс *Задание параметров обработки сигнала и физических условий сканирования* обеспечивает вызов метода объекта, реализующего этот интерфейс.

Функция *Выбор геометрии острия иглы* позволяет пользователю выбрать один из типов формы острия и указать размеры его частей. Кроме того, возможно задание формы объекта в виде алгебраической функции.

Класс *Расчет модели рельефа* обеспечивает асинхронный вызов функций моделирования рельефа в нескольких потоках. Каждая из них реализует расчет рельефа поверхности в соответствии с заданной физической моделью взаимодействия иглы и поверхности. Реализованная возможность замены класса позволяет использовать для расчета более сложную модель взаимодействия.

Расчеты по сложным физическим моделям могут занимать достаточно много времени. Для ускорения вычислений, функция расчета модели рельефа реализована таким образом, чтобы обеспечить параллельное выполнение несколькими потоками с использованием распараллеливания процесса обработки по строкам сканирования. Функции механизма синхронизации и обработки возникающих исключений содержатся в классе *Монитор параллельного выполнения*.

С целью обеспечения гибкости и кроссплатформенности, вывод на экран реализуется в независимом модуле с использованием API Win32 GDI/GDI+, GTK или OpenGL.

Группа компонент *Локальные критерии оценки точности* представляет собой набор классов, которые обеспечивают визуализацию модели рельефа в виде вертикальных срезов, построение двумерных изображений моделей сканируемой поверхности и острия иглы и раскрашивание точек на изображениях для визуализации величины отклонения туннельной оболочки от поверхности. Группа компонент *Глобальные критерии оценки точности* объединяет классы, с помощью которых выполняется построение двумерного и трехмерного изображений рельефа и исследование его геометрии с помощью местных видов и разрезов.

Группа компонент *Вывод* осуществляет вывод обработанных данных в файл с метаинформацией о параметрах сканирования.

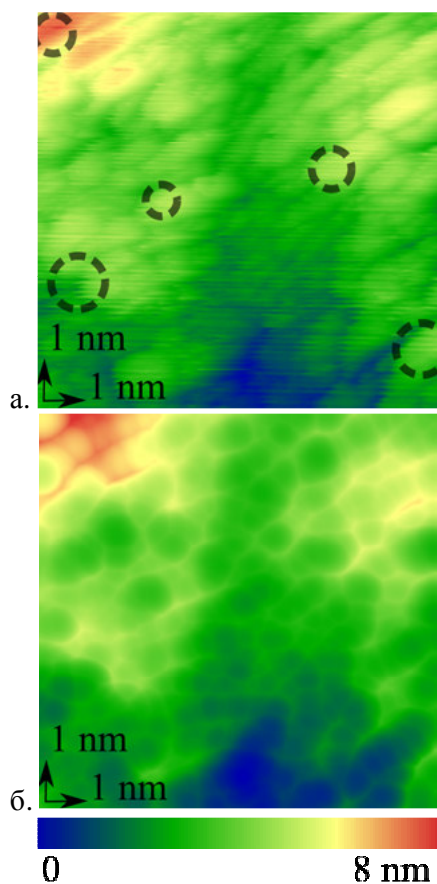


Рис. 3. Поверхность платины на подложке размером 30x30 нм.  
*a* – исходное изображение,  
*б* – после обработки.

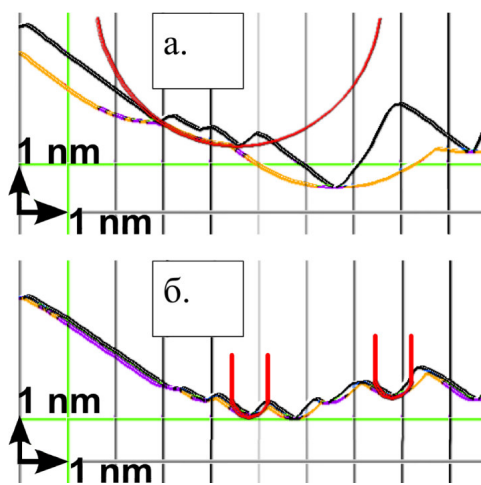


Рис. 4. Профили исходного (верхняя кривая), моделированного (нижняя кривая) рельефов и положение туннельных оболочек при сканировании.  
*a* – радиус закругления 3 нм, *б* – 0,6 нм.

Далее в главе обосновывается выбор языка С# в среде .NET для реализации рассмотренного проекта. Решающим аргументом выбора является поддержка языком различных возможностей по модификации программного кода и обеспечению многопоточности, что делает возможным реализацию этих функций при сравнительно небольших трудозатратах.

**В четвертой главе** диссертации описывается опытная программная реализация разработанной модели комплекса обработки данных зондовой микроскопии, предназначенная для туннельного микроскопа, и приводятся результаты применения этого программного комплекса в научных исследованиях.

В качестве модели геометрии острия иглы, пользователю предоставляются трехмерные модели в виде цилиндра и конуса вращения, которые оканчиваются сферической поверхностью. Реализованы также двумерные модели в виде параболы и полуокружности.

Разработанный комплекс использовался в исследованиях поверхности металлов, проводившихся в Российском химико-технологическом университете им. Д.И. Менделеева в 2004 - 2009 годах. Одно из изображений дано на рис. 3*a*. Подложка содержит нанобразования размером от 1 до 6 нм.

Рис. 4 поясняет работу алгоритма определения формы и размеров острия иглы. Из рисунка



видно, что если радиус закругления выбран слишком большим, то для построенного для этой иглы рельефа неравенство (2) нарушается в большинстве точек измерения (отрезки профиля модели рельефа, соответствующие таким точкам, помечены желтым цветом). В случае меньшего радиуса закругления (*б*), неравенство выполняется почти во всех узлах сетки измерений.

Учет формы и размеров острия иглы позволяет уменьшить зашумленность изображений (рис. 3). В обработанных изображениях отсутствуют некоторые образования (артефакты), существование которых противоречит наличию у иглы конечных размеров (на рис. 3а отмечены пунктиром). Преобразование с использованием модели острия иглы изменяет соотношения между размерами элементов получаемой модели рельефа поверхности.

### **Основные результаты диссертационной работы:**

1. Создан алгоритм учета формы и размеров иглы туннельного микроскопа путем интерактивной обработки информации о процессе сканирования нанорельефа исследуемого образца. Показано, что программная модель для реализации алгоритма не представима в виде программной модели графических фильтров, обеспечивающих обработку информации путем последовательного применения прямых функциональных преобразований.
2. Разработаны способы обеспечения многопоточности обработки информации и модификации программного кода модулей для программного комплекса зондовой микроскопии с учётом ограничений сложности и трудоёмкости реализации.
3. Реализован программный комплекс туннельного микроскопа и продемонстрирована его эффективность в исследованиях нанорельефа поверхности.

### **Список публикаций по теме диссертации**

1. В.А. Карташев, В.В. Карташев. Исследование процесса электрохимической заточки иглы туннельного микроскопа. Нано- и микросистемная техника №7, М.: Новые технологии, 2007.

2. В.А. Карташев, В.В. Карташев. Влияние колебаний оснований туннельного микроскопа на отклонения от программного движения зонда. Теория и системы управления. М.: Известия РАН, №8, 2008.
3. В.А. Карташев, В.В. Карташев Исследование движения иглы туннельного микроскопа относительно поверхности. Нано- и микросистемная техника №10, М.: Новые технологии, 2007.
4. В.А. Карташев, В.В. Карташев. Определение формы и размера острия иглы туннельного микроскопа. Нано- и микросистемная техника №10, М.: Новые технологии, 2010.
5. В.В. Карташев. Разработка программных средств для деконволюции изображения поверхности с учетом формы острия иглы туннельного микроскопа. Сборник докладов второго международного форума по нанотехнологиям Rusnanotech'09, 2009.
6. В.В. Карташев. Численное моделирование некоторых физических процессов в нанотехнологиях. Сборник тезисов лучших дипломных работ 2007 года. М.: Издательский отдел факультета ВМиК МГУ, 2007.
7. В.А. Карташев, В.В. Карташев, А.С. Соломатин. Анализ изображений поверхности, получаемых с помощью туннельного микроскопа. Труды конференции «Интеллектуальные и многопроцессорные системы – 2005». Таганрог: ТРТУ, 2005.
8. В.В. Карташев. Технология исследования рельефа поверхности с помощью СТМ. 11 международный семинар-ярмарка «Российские технологии для индустрии». Нанотехнологии в электронике, энергетике, экологии. СПб: 2007.
9. В.В. Карташев. Программный комплекс для интерпретации СТМ измерений поверхности рельефа, определения формы и размеров нанобъектов. Сборник докладов третьего международного форума по нанотехнологиям, 2010.