

На правах рукописи

Смольянинов Николай Александрович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА И МОДИФИКАЦИИ
СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Владивосток – 2013

Работа выполнена на кафедре компьютерных систем Школы естественных наук Дальневосточного федерального университета.

Научный руководитель: Грудин Борис Николаевич,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Саранин Александр Александрович, чл.-корр.
РАН, доктор физико-математических наук,
профессор, зам. директора по научной работе
ИАПУ ДВО РАН

Фищенко Виталий Константинович,
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник, зав. лаб. анализа океанологической
информации ТОИ ДВО РАН

Ведущая организация: Институт прикладной математики
Дальневосточного отделения РАН,
г. Владивосток

Защита состоится «22» марта 2013 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 005.007.01 в Институте автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН.

Автореферат разослан «____» февраля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 005.007.01
к.т.н.



А.В. Лебедев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. С конца 60-х годов в оптической и электронной микроскопии начинают широко использоваться методы цифровой обработки изображений (А. Розенфельд, У. Прэтт, Р. Гонсалес, Л. Брейсуэлл, И. Добеши, Н.М. Астафьева и др.). К середине 80-х годов в СССР разработан метод оптико-структурного машинного анализа микроскопических изображений (К.М. Богданов, К.А. Яновский, Б.П. Пантелеев, Ю.Г. Козлов, В.И. Шихер, В.С. Эм), а также комплекс аппаратуры «Протва», в состав которого входили оптические и электронные микроскопы, мини ЭВМ, автоматизированная система дифракционного анализа изображений, система морфометрического анализа микрообъектов, система обработки телевизионных изображений. В последние годы многократно увеличилась возможности электронно-оптических методов исследования, особенно в части, касающейся цифровой обработки изображений. Однако по-прежнему актуальной остается разработка новых методов обработки, использующих моделирование, спектральный анализ и фильтрацию микроскопических изображений.

Важнейшим компонентом исследований с использованием методов электронной и оптической микроскопии является моделирование. Средствами моделирования можно получить «идеальные» изображения типичных микроструктур в материале, исследовать природу их контраста в зависимости от флуктуаций плотности и статистических особенностей неоднородностей материала, оценить искажения, возникающие в изображающих системах микроскопов. Поскольку спектры Фурье являются широко распространенными характеристиками микроскопических изображений, то можно поставить задачу моделирования изображений с заданными интегральными спектральными характеристиками (ИСХ), за счет модификации спектра исходного изображения. При этом могут быть смоделированы изображения с фрактальными свойствами, для которых ИСХ будут инвариантны относительно мультипликативных изменений масштаба. Желательно, чтобы смоделированные изображения также обладали максимальным сходством с исходными изображениями. В этом случае фрактальный анализ позволит установить, в какой степени, отображенные на изображениях структуры, проявляют фрактальные признаки.

Отметим также, что при моделировании больших по информационной емкости изображений вместо дискретного преобразования Фурье во многих случаях предпочтительнее использовать другие ортогональные преобразования. В связи с этим актуальной является разработка методов и алгоритмов моделирования, спектрального анализа и фильтрации микроскопических изображений на основе различных ортогональных преобразований, в том числе и вейвлет-преобразований, которые более эффективны, чем методы и алгоритмы, основанные на преобразовании Фурье. Важно, чтобы полученные с помощью ортогональных преобразований ИСХ, были инвариантны относи-

тельно мультипликативных изменений масштаба сдвигов и поворотов смоделированного изображения.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование методов, алгоритмов и программных средств для моделирования микроскопических изображений на основе анализа и модификации спектральных характеристик ортогональных преобразований и применение их при изучении структуры различных сред и материалов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**.

1. Разработать и исследовать методы моделирования микроскопических изображений на основе обобщенной фильтрации с использованием различных фильтров и модификации интегральных характеристик обобщенных спектров изображений.
2. Разработать и исследовать методы моделирования микроскопических изображений с заданными фрактальными характеристиками, инвариантными относительно мультипликативных изменений масштаба, сдвигов и поворотов смоделированного изображения.
3. Разработать комплекс программ, реализующий алгоритмы моделирования изображений на основе обобщенного спектрального анализа, пространственно-частотной, в том числе вейвлет - фильтрации, фрактального анализа и фрактальной фильтрации.
4. Применить разработанные методы и комплекс программ для нелинейной НЧ- и ВЧ- фильтрации, устранения искажений непериодических наноструктур на изображениях, полученных в системе визуализации электронного микроскопа с дефокусировкой, идентификации спектральных плотностей микроструктур по электронно-микроскопическим изображениям, исследованиях по изображениям кристаллических и магнитных наноструктур в твердом теле, термохалинных неоднородностей в морской воде, облачного покрова в атмосфере Земли.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались теория ортогональных и вейвлет-преобразований, теория и методы цифровой обработки и моделирования изображений, теория вероятности и математическая статистика, методы фрактальной обработки многомерных сигналов, методы объектно-ориентированного программирования.

Научная новизна результатов диссертационной работы.

1. Разработан метод моделирования изображений, основанный на модификации интегральных спектральных характеристик ортогональных преобразований в схеме обобщенной пространственно-частотной фильтрации, при которой сохраняется фаза, либо знак амплитуды соответствующего ортогонального преобразования исходного изображения.
2. Впервые предложен метод моделирования изображений с заданными фрактальными характеристиками на основе обобщенной пространственно-частотной фильтрации и модификации интегральной частотной характеристики (ИЧХ) модуля амплитуды в убывающую по степенному закону

функцию. Для смоделированных изображений построены фрактальные меры в пространственной области, которые инвариантны относительно мультипликативных изменений масштаба.

3. Разработан и исследован новый метод устранения искажений непериодических наноструктур на изображениях, полученных в системе визуализации электронного микроскопа с дефокусировкой. Метод основан на коррекции распределения фаз преобразования Фурье этого изображения в соответствии с распределением нулей частотной характеристики системы визуализации, а ИЧХ модифицируется в убывающую по степенному закону функцию.
4. Разработан и исследован метод идентификации спектральных плотностей микроструктур по электронно-микроскопическим изображениям, основанный на аппроксимации ИЧХ суперпозицией спектральных плотностей и последующем моделировании изображений с полученной по результатам аппроксимации ИЧХ.

Практическая ценность и реализация результатов, полученных в диссертационной работе.

Разработанные в диссертации методы моделирования и анализа изображений позволяют получить новые результаты при исследованиях по изображениям кристаллических и магнитных наноструктур в твердом теле, термохалинных неоднородностей в морской воде, облачного покрова в атмосфере Земли. Создан комплекс программ для моделирования и анализа микроскопических изображений, реализующий разработанные в диссертации методы.

Результаты диссертации используются в учебном процессе Дальневосточного федерального университета (ДВФУ) при проведении компьютеризированных лабораторных работ по оптико-электронной и цифровой обработке изображений, радиооптике и физической оптике, в научных исследованиях НИИ эпидемиологии и микробиологии СО РАМН.

Выполненные в диссертации исследования включались в основные направления научно-исследовательских работ ДВГУ и ДВФУ в 2009-2012 г.г. Исследования поддерживались РФФИ (грант № 08-02-90030), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 годы» (госконтракт № 14.740.11.1015), ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы» (госконтракт № 16.515.12.5005).

Положения, выносимые на защиту:

- метод моделирования изображений на основе модификации интегральных спектральных характеристик ортогональных преобразований в схеме обобщенной пространственно-частотной фильтрации.
- метод моделирования изображений с заданными фрактальными характеристиками.
- метод устранения искажений непериодических наноструктур на изображениях.

- метод идентификации спектральных плотностей микроструктур по электронно-микроскопическим изображениям.
- алгоритмы и комплекс программ, реализующий разработанные в диссертации методы.

Обоснованность и достоверность результатов работы обеспечиваются корректным применением используемых методов исследования, результатами компьютерного моделирования, а также применением предложенных в диссертации методов и алгоритмов в практической деятельности по обработке изображений в различных предметных областях.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих международных и российских конференциях и семинарах: Всероссийская конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике ИФИТ ДВГУ (г. Владивосток, 2009); II Всероссийская конференция «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях» МИФИ (г. Москва, 2009); XXIII Российская конференция по электронной микроскопии (г. Черноголовка, 2010); 5th Congress of the International Union of Microbeam Analysis Societies «Microbeam Analysis for Future Science and Technology» (Seoul, Korea, 2011); 5-ый международный симпозиум «Химия и химическое образование» (г. Владивосток, 2011); Международная конференция «Потоки и структуры в жидкостях: физика геосфер» (г. Владивосток, 2011).

Публикации результатов работы. По теме диссертации опубликовано 25 работ, в том числе 8 статей в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, и 8 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 133 наименования. Работа изложена на 154 страницах текста и содержит 40 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, представлены новые научные результаты, выносимые на защиту, отмечена практическая ценность, приведены данные об апробации и реализации работы, публикациях и структуре диссертации.

Первая глава содержит обзор основных методов и алгоритмов моделирования и анализа микроскопических изображений. Многие из этих алгоритмов программно реализованы в лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений (ЛЭМОИ) ДВФУ и являются частью программного комплекса, разработанного в диссертации.

В 1.1 рассмотрены методы спектрального анализа и спектральные характеристики, использующиеся при анализе микроскопических изображений. Спектральные характеристики изображений позволяют количественно описывать упорядочения и анизотропию в структуре, оценивать и идентифици-

ровать спектральные плотности исследуемых по изображениям микроструктур, исследовать динамические изменения корреляционно-спектральных характеристик неоднородностей при фазовых переходах и внешних воздействиях. Рассмотрены программные средства для спектрального анализа микроскопических изображений, разработанные в ЛЭМОИ ДВФУ.

В 1.2 рассмотрены методы моделирования микроскопических изображений, основанные на принципах физической оптики и радиооптическом подходе к физике дифракции. Описывается структура программных средств, разработанных в ЛЭМОИ ДВФУ для моделирования микроскопических изображений, представленная программами для моделирования комплексных функций пропускания «тонких» и «толстых» объектов и программами для моделирования многокомпонентных когерентных оптических систем, «теневых» приборов и просвечивающих электронных микроскопов.

В 1.3 рассмотрены программно реализованные в ЛЭМОИ ДВФУ методы фильтрации микроскопических изображений, позволяющие компенсировать aberrации оптических систем микроскопов, устранять шумы, смаз и размытие изображений, осуществлять поиск нужного фрагмента на зашумленных изображениях, подчеркивать границы неоднородностей и слабо выраженные регулярные компоненты, удалять низкочастотные тренды освещенности. Сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе рассматриваются методы и алгоритмы моделирования, спектрального анализа и фильтрации микроскопических изображений на основе различных ортогональных преобразований, в том числе и вейвлет-преобразований, которые более эффективны, чем методы и алгоритмы, основанные на преобразовании Фурье.

В 2.1 рассматриваются методы обобщенного спектрального анализа изображений на основе ортогональных преобразований. Пусть $f(j_1, j_2)$ - дискретное представление непрерывного изображения $f(x, y)$. Для простоты положим, что матрица дискретного изображения квадратная и включает в себя $(N \times N)$ элементов, т.е. $j_1, j_2 = 0, 1, \dots, N - 1$. В результате прямого ортогонального преобразования с ядром $T(j_1, j_2; u_1, u_2)$ матрица $f(j_1, j_2)$ преобразуется в матрицу $F_T(u_1, u_2)$ того же размера с элементами

$$F_T(u_1, u_2) = \sum_{j_1=0}^{N-1} \sum_{j_2=0}^{N-1} f(j_1, j_2) T(j_1, j_2; u_1, u_2),$$
 где $u_1, u_2 = 0, 1, \dots, N - 1$ - обобщенные пространственные частоты. Возврат к исходному изображению осуществляется с помощью обратного ортогонального преобразования $T^{-1}(j_1, j_2; u_1, u_2)$.

В диссертации рассматриваются следующие ортогональные преобразования, для которых существуют быстрые алгоритмы: дискретное преобразование Фурье $F_F(u_1, u_2)$ (ДПФ), дискретное косинусное преобразование $F_C(u_1, u_2)$ (ДКП), дискретное преобразование Хартли $F_H(u_1, u_2)$ (ДПХ) и Q - преобразование $F_Q(u_1, u_2)$. Выражение $I_T(u_1, u_2) = |F_T(u_1, u_2)|^2$ рассматривается как

обобщенная периодограмма изображения $f(j_1, j_2)$, которая является источником спектральных характеристик. Интегральная частотная характеристика (ИЧХ) $V_T(m)$ получается при усреднении обобщенной периодограммы $I_T(u, \varphi)$, заданной в полярной системе координат (u, φ) , в кольцевых зонах определенной ширины, а интегральная пространственная характеристика (ИПХ) $S_T(n)$ - при усреднении периодограммы в угловых секторах определенного раstra. Здесь: m - номер кольца, n - номер сектора; максимальное число колец равно $N - 1$ и в этом случае $V_T(m) = V(u)$, $u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$. Показано, что $V_F(m) = V_Q(m) = V_H(m) = V(m)$, ИПХ $S_F(n)$ можно получить, вычисляя $I_H(u, \varphi)$, а распределение $V_C(m)$, как правило, является достаточно хорошей оценкой $V_F(m)$. Применение для спектрального анализа рассмотренных выше унитарных преобразований позволяет в операционной системе MS Windows сократить время расчетов в среднем в 1,3 - 1,6 раза и увеличить размеры обрабатываемых изображений, по меньшей мере, в 2 раза.

В 2.2 рассматриваются методы обобщенной фильтрации изображений. Для рассмотренных выше ортогональных преобразований процедуру обобщенной фильтрации можно записать в виде

$$g_T(j_1, j_2; a) = \sum_{u_1=0}^{N-1} \sum_{u_2=0}^{N-1} F_T(u_1, u_2) H(u_1, u_2) T^{-1}(j_1, j_2; u_1, u_2), \quad (1)$$

где $g_T(j_1, j_2)$ - результат фильтрации; $H(u_1, u_2)$ - фильтр обобщенных пространственных частот. Для изотропных фильтров $H(u_1, u_2) = H(\sqrt{u_1^2 + u_2^2})$ и фильтров, для которых $H(-u_1, u_2) = H(u_1, -u_2)$, результаты фильтрации на основе преобразования Фурье, Хартли, Q - преобразования совпадают. Исследованы отличия, возникающие при использовании косинусного преобразования. Показано, что при использовании для фильтрации косинусного преобразования на границах изображения изменения яркости такие же, как и вдали от границ, поэтому на границах отфильтрованного изображения практически отсутствуют квазипериодические структуры, воспринимаемые зрителем, как артефакты. Это позволяет в ряде случаев существенно улучшить психофизическое восприятие отфильтрованных изображений при низкочастотной (НЧ), высокочастотной (ВЧ), полосовой фильтрации, устранении размытия изображений.

В 2.3 разработаны методы моделирования изображений с заданными спектральными характеристиками. Запишем ДПФ цифрового изображения $f(j_1, j_2)$ в виде $F(u_1, u_2) = A(u_1, u_2) Z(u_1, u_2)$, где $Z(u_1, u_2) = \exp[i\psi(u_1, u_2)]$, $\psi(u_1, u_2)$ - распределение фаз ДПФ. Моделирование изображения $f_1(j_1, j_2)$ с заданной периодограммой $I_F(u_1, u_2)$ можно осуществить по формуле

$$f_1(j_1, j_2) = \frac{1}{N} \sum_{u_1=0}^{N-1} \sum_{u_2=0}^{N-1} \sqrt{I_F(u_1, u_2)} Z(u_1, u_2) \exp\left[i \frac{2\pi}{N} (u_1 j_1 + u_2 j_2)\right]. \quad (2)$$

Обычно при расчетах по формуле (2) в качестве изображения $f(j_1, j_2)$ используется реализация «белого шума» $n(j_1, j_2)$. Моделирование изображений с заданной периодограммой можно осуществить на основе преобразования Хартли. Задание конкретного вида периодограммы $I_F(u_1, u_2)$ может быть использовано для моделирования модифицированных изображений $f_1(j_1, j_2)$, обладающих специальными статистическими свойствами. Моделирование изображений с заданной ИЧХ также можно осуществить, пропуская двумерную реализацию белого шума через линейный фильтр с действительной частотной характеристикой $H(u)$, модуль которой $|H(u)| = \sqrt{V(u)}$. При этом, однако, смоделированные изображения при заданной ИЧХ очень похожи друг на друга и зачастую не имеют никакого сходства (в плане психофизического восприятия) с изображением, для которого эта ИЧХ была вычислена. Это говорит о том, что ИЧХ не является для какого-то класса изображений строго заданной функцией, и ее вид всегда может быть модифицирован, но так, чтобы вновь полученное изображение удовлетворяло исследователя. Такую модификацию осуществим следующим образом. Умножим модуль ДПФ $A(u_1, u_2)$ на функцию $B(u_1, u_2) = C(u_1, u_2)/V^{1/2}(u)$, где $C(u_1, u_2)$ - функция, модифицирующая ИЧХ $V(u)$. Осуществим обратное ДПФ от произведения $A(u_1, u_2)B(u_1, u_2)Z(u_1, u_2)$. В результате получим изображение

$$f_2(j_1, j_2) = \frac{1}{N} \sum_{u_1=0}^{N-1} \sum_{u_2=0}^{N-1} A(u_1, u_2) B(u_1, u_2) Z(u_1, u_2) \exp\left[i \frac{2\pi}{N} (u_1 j_1 + u_2 j_2)\right], \quad (3)$$

которое совпадает с исходным, если ИЧХ не модифицируется, то есть $B(u_1, u_2) = 1$, $C(u_1, u_2) = V^{1/2}(u)$. Аналог выражения (3) для рассмотренных выше ортогональных преобразований имеет вид

$$f_2(j_1, j_2) = \sum_{u_1=0}^{N-1} \sum_{u_2=0}^{N-1} A_T(u_1, u_2) B_T(u_1, u_2) \operatorname{sgn}[F_T(u_1, u_2)] T^{-1}(j_1, j_2; u_1, u_2), \quad (4)$$

где $B_T(u_1, u_2) = C(u_1, u_2)/V_T^{1/2}(u)$, $V_T(u)$ - ИЧХ для соответствующего ортогонального преобразования в плоскости обобщенных частот.

В 2.4. рассматриваются методы моделирования изображений на основе анализа спектральных характеристик вейвлет-преобразований. В случае непрерывного вейвлет-преобразования на основе фурье-образов вейвлетов Гаусса и Морле строятся фильтры

$$H_1(u, m) = a_m^n \left(\frac{2\pi}{N} u\right)^n \exp\left[-a_m^2 \left(\frac{2\pi}{N} u\right)^2 / 2s_0\right], \quad (5)$$

$$H_2(u, m) = \exp\left[-a_m^2 \left(\frac{2\pi}{N} (u - u_0 / a_m)\right)^2 / 2\right], \quad (6)$$

где $a_m = N 2^{-m(\log_2 N)/M-1}$, n - номер производной функции Гаусса, s_0 и u_0 - числовые параметры соответственно фильтров Гаусса и Морле. При изменении

m от 0 до $M-1$ масштаб a_m будет уменьшаться от N до 1. Для данных фильтров $H(u; m)$ выполняется условие $\sum_{m=0}^{M-1} H(u; m) \approx c$, где c - некоторая константа не равная нулю, что позволяет осуществлять моделирование изображений $g_T(j_1, j_2; m)$, для которых $f(j_1, j_2) \approx \frac{1}{c} \sum_{m=0}^{M-1} g_T(j_1, j_2; m)$. Для определения диапазонов изменения параметра m предлагается использовать скалограммы $G_T(m)$ унитарных преобразований

$$G_T(m) = \sum_{u_1=0}^{N-1} \sum_{u_2=0}^{N-1} |F_T(u_1, u_2)|^2 H^2(u_1, u_2; m). \quad (7)$$

Фактически скалограммы представляют собой спектральные характеристики, получаемые из обобщенного спектра суммированием энергии в кольцевых зонах, ширина которых растет с увеличением обобщенной частоты.

Для моделирования и анализа изображений на основе дискретного вейвлет-преобразования в диссертации используются вейвлеты Добеши 2,4,8, Симлета - 4, Коифлетса - 2, а также биортогональные вейвлеты Добеши - 9/7. При моделировании изображений проектируются фильтры, выделяющие компоненты различного уровня и направления. Пользователю предлагаются средства для построения распределений (скалограмм) и средства для анализа анизотропности изображений. Приводятся примеры моделирования с использованием непрерывных и дискретных вейвлет-преобразований.

В третьей главе рассматриваются методы и алгоритмы моделирования и анализа фрактальных изображений.

В 3.1 описываются стохастические фрактальные изображения, имеющие степенные спектральные плотности. Программно реализованные в диссертации методы оценивания фрактальной размерности условно можно разбить на две группы: методы, использующие при оценивании исходное изображение (метод Пентланда и метод покрытий), и методы, основанные на вычислении ИЧХ спектра.

В 3.2 рассматриваются методы моделирования стохастических фрактальных изображений: алгоритм последовательных случайных сложений и алгоритм фурье-фильтрации. Оценивалась фрактальная размерность модельных изображений, полученных с использованием рассмотренных выше алгоритмов. Установлено, что наиболее подходящим для моделирования фрактальных изображений является алгоритм фурье-фильтрации, поскольку все графики зависимости оценки фрактальной размерности от заданной для соответствующего тестового изображения хорошо аппроксимируются линейными зависимостями. Для повышения точности оценки фрактальной размерности можно использовать метод коррекции хода кривой фрактальной размерности в зависимости от фрактальной размерности тестовой структуры.

Предложен и исследован метод моделирования анизотропных фрактальных изображений. Программно возможно задание анизотропных спектральных плотностей. В этом случае фурье-образ реализации поля с заданной

спектральной плотностью умножается на функцию анизотропности, задающую новую анизотропию двумерного поля. От полученного произведения осуществляется обратное преобразование Фурье.

В 3.3 рассматриваются разработанные в диссертации методы и алгоритмы моделирования изображений с фрактальными характеристиками на основе обобщенной пространственно-частотной фильтрации, при которой сохраняется фаза, либо знак амплитуды соответствующего ортогонального преобразования исходного изображения, а модуль амплитуды убывает по степенному закону либо для всего обобщенного спектра изображения, либо для интегральной частотной характеристики спектра. На рис. 1, *а* показано широко используемое при тестировании исходное изображение «Портрет» и модуль его преобразования Фурье (в левом верхнем углу). На рис. 1, *б* - смоделированное согласно (2) при $I_F(u_1, u_2) = 1/(u_1^2 + u_2^2)^{\beta/2}$ фрактальное изображение и его изотропный энергетический спектр ($\beta = 2.5$).



Рис. 1. Синтез фрактальных изображений на основе преобразования Фурье

Это изображение имеет сходство с исходным изображением, но как бы покрыто некоторой фрактальной пеленой. В спектре нет откликов на квази-периодические компоненты, содержащиеся в исходном изображении. Чтобы сохранить информацию об анизотропии исходного энергетического спектра

и локализации отдельных спектральных компонент осуществим моделирование по формуле (3) при $C(m, n) = 1/(m^2 + n^2)^{\beta/4}$. На рис. 1, в, г показаны реализации синтезированных таким образом изображений и их спектры при $\beta = 2.5$ и $\beta = 2.1$ соответственно. Эти изображения очень схожи с исходным, хотя ИЧХ их энергетических спектров не имеет выделенных масштабов.

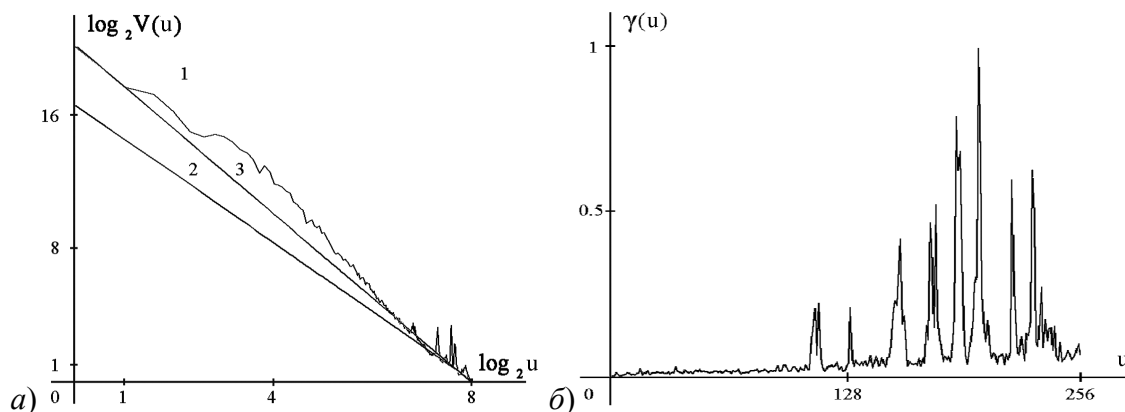


Рис. 2. Интегральные характеристики энергетического спектра исходного и смоделированных изображений, показанных на рис. 1

На рис. 2, а приведены в двойном логарифмическом масштабе ИЧХ исходного изображения (кривая 1), ИЧХ изображения, показанного на рис. 1, г (прямая 2), и ИЧХ изображений, показанных на рис. 1, б, в (прямая 3), которые совпадают. ИЧХ $V(u)$ синтезированных изображений является инвариантом относительно мультипликативных уменьшений масштаба в области пространственных частот, а также сдвигов и поворотов исходного изображения. Для выбора β можно использовать множество самых различных критериев, начиная от комфортного психофизического восприятия синтезированного изображения и заканчивая различными критериями оптимальности. При моделировании изображений с фрактальными характеристиками по формуле (3) инвариантом является функция анизотропности пространственного спектра $\gamma(u) = E_{\max}(u) / \langle E(u) \rangle$, где $E_{\max}(u)$ - максимальное значение энергетического спектра для данного u , а $\langle E(u) \rangle$ - среднее значение. На рис. 2, б приведен график функции $\gamma(k)$ для изображений, показанных на рис. 1, а, в, г, на котором ярко выражены отклики на квазипериодические компоненты, содержащиеся в этих изображениях.

Построены фрактальные меры в пространственной области, которые для смоделированных изображений, как и интегральная частотная характеристика, инвариантны относительно мультипликативных изменений масштаба. С использованием данных мер разработана процедура фрактальной фильтрации изображений структур различных масштабов. Показано, что разработанные в данном разделе методы и алгоритмы позволяют осуществить нелинейную НЧ- и ВЧ- фильтрации, а в некоторых случаях и восстановление изображений.

В четвертой главе рассматриваются разработанные в диссертации методы и программные средства применяются для моделирования и анализа изображений различных сред и материалов.

В 4.1 приводится описание разработанного комплекса программ, реализующего алгоритмы моделирования изображений на основе обобщенного спектрального анализа, пространственно-частотной, в том числе вейвлет-фильтрации, фрактального анализа и фрактальной фильтрации. Структура разработанных программных средств представлена на рис. 3.

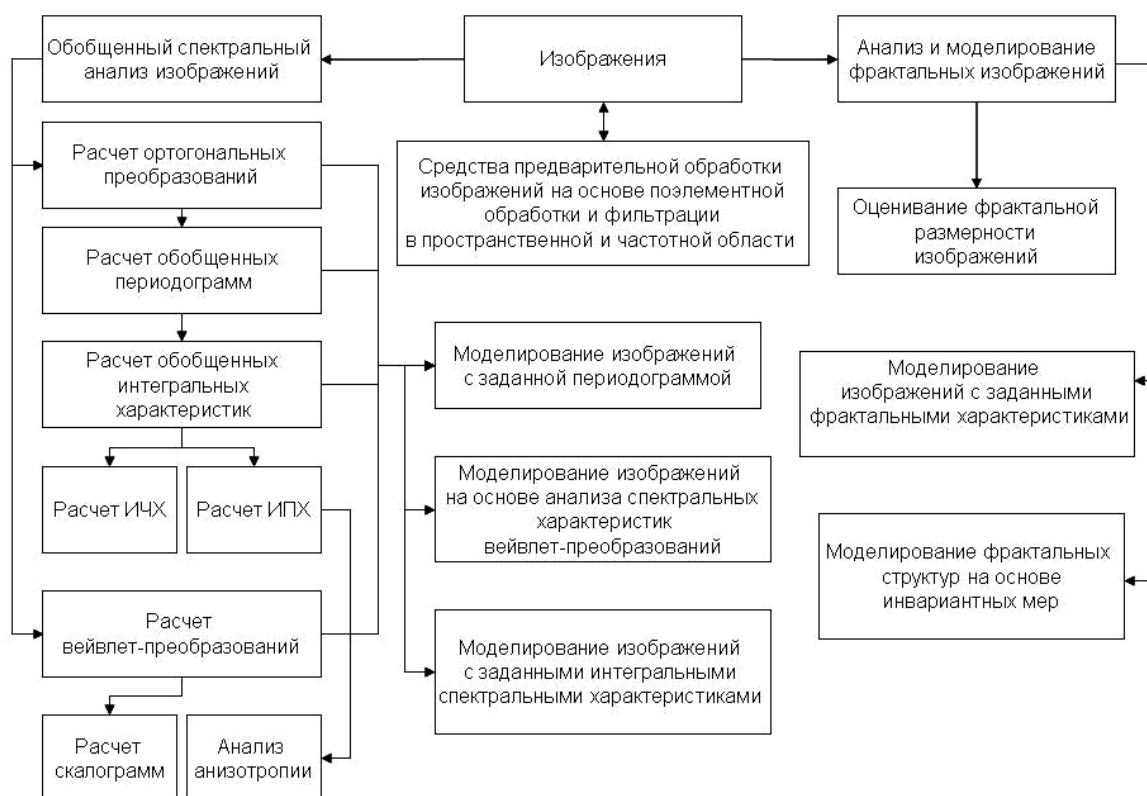


Рис. 3. Структура программного комплекса

В 4.2 разработан и исследован метод идентификации спектральных плотностей микроструктур по электронно-микроскопическим изображениям. Для моделирования ИЧХ таких изображений использовалась суперпозиция спектральных плотностей 1-го (монотонно убывающие) и 2-го (имеющие максимумы не на нулевой частоте) типов вида

$$V(u) = \sum_{k=1}^K a_k u^{-\alpha_k} + b_k \exp[-\beta_k (u - \gamma_k)^2], \quad (8)$$

где $a_k, \alpha_k, b_k, \beta_k, \gamma_k$ - положительные числа, $k = 1, 2, \dots, K$, K - число областей, на которые разбивается область определения ИЧХ. Первое слагаемое моделирует фрактальную составляющую ИЧХ, а второе - квазипериодическую. Степень соответствия исходных $f(j_1, j_2)$ изображений смоделированным изображениям $f_0(j_1, j_2)$ оценивалась как по их схожести в плане психофизического восприятия, так и с помощью расчета среднеквадратического

расстояния $d(f, f_0) = \sqrt{M[(f(j_1, j_2) - f_0(j_1, j_2))^2]}$, где M - оператор усреднения. На рис. 4 показана процедура аппроксимации ИЧХ изображения аморфного сплава суперпозицией двух функций фрактальной и квазипериодической вида (8). Здесь: *a* – исходное изображение, *б* - рассчитанная ИЧХ (кривая 1) и результат ее аппроксимации; *в* - изображение, смоделированное по алгоритму (2) в соответствии с ходом аппроксимирующей кривой 2; *г* - изображение, смоделированное по алгоритму (3) с ИЧХ, описывающейся кривой 3. Расстояние $d(f, f_0)$ между исходным изображением и смоделированным по алгоритму (2) – 0.082, а расстояние между исходным изображением и смоделированным по алгоритму (3) – 0.0084, т.е. почти на порядок меньше.

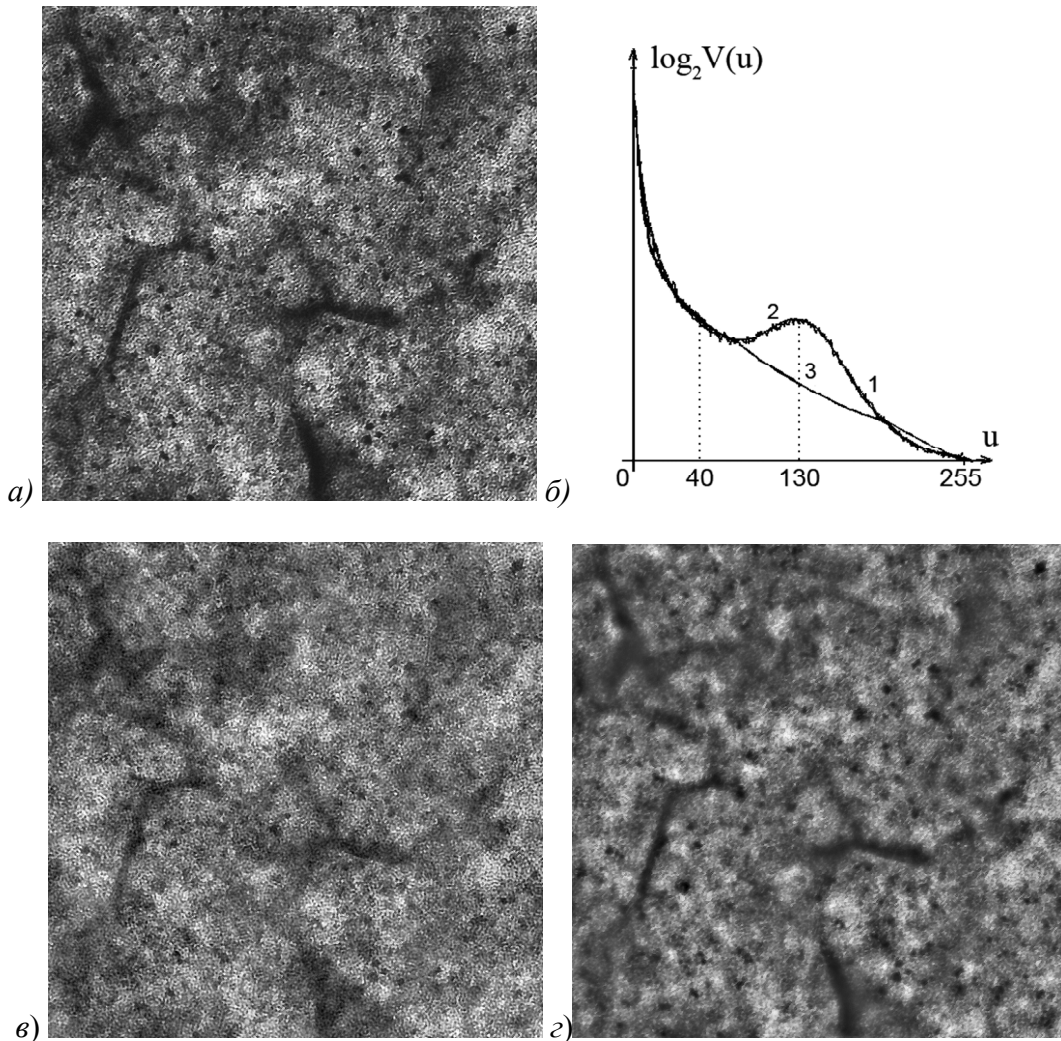


Рис. 4. Процедура аппроксимации ИЧХ и моделирования микроскопических изображений образца АС

Разработан метод моделирования изображений, основанный на модификации изображений с анизотропными ИПХ. Распределение анизотропии в спектре изображения предлагается описывать дискретной функцией $G_i = S_0 / S_i$, где S_i ($i = 1, 2, \dots, K$) – значение ИПХ в i -ом секторе, K - количество секторов, S_0 - максимальное значение ИПХ. Модификацию изображе-

ния $f(j_1, j_2)$ в изображение с изотропной ИПХ $f_3(j_1, j_2)$ можно осуществить, например, с помощью следующего преобразования

$$f_3(j_1, j_2) = \frac{1}{N} \sum_{u_1=0}^{N-1} \sum_{u_2=0}^{N-1} A(u_1, u_2) G_i^{1/2}(u_1, u_2) Z(u_1, u_2) \exp\left[i \frac{2\pi}{N} (u_1 j_1 + u_2 j_2)\right]. \quad (9)$$

Анизотропия ИПХ может быть связана как с искажениями в системе визуализации микроскопа типа смаз, так и с анизотропным распределением структур в образце. Очевидно, что степень анизотропии ИПХ модифицированных изображений можно сделать регулируемой, тем самым ослабляя или увеличивая контраст микроструктур в выбранных направлениях.

В 4.3 разработан и исследован метод устранения искажений непериодических наноструктур на изображениях, полученных в системе визуализации электронного микроскопа с дефокусировкой. Метод основан на коррекции распределение фаз преобразования Фурье этого изображения в соответствии с распределением нулей частотной характеристики системы визуализации, а ИЧХ модифицируется в убывающую по степенному закону функцию. На рис. 5, а показано искаженное в системе визуализации электронного микроскопа изображение наноструктур в образце АС, а на рис. 5, б восстановленное изображение. По восстановленному изображению можно смоделировать изображение практически не отличающееся от исходного, что является одним из подтверждений правильности выбранной модели формирования и восстановления искаженного изображения. Данная методика применима при восстановлении всей иерархии микроструктур, визуализированных данным методом, если образец является тонким, слабофазовым и слабопоглощающим, а отношение коэффициентов амплитудной и фазовой модуляции электронного пучка в образце меньше 0.2.

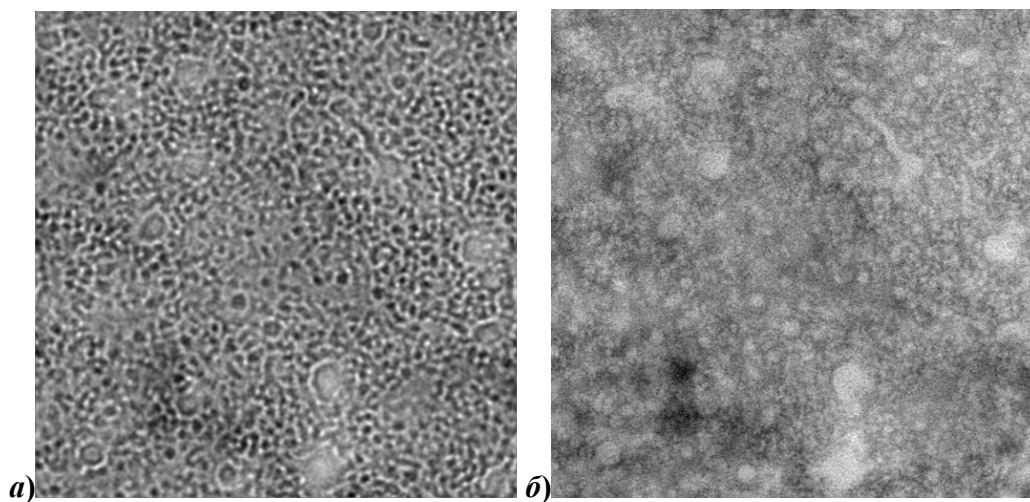


Рис. 5. Исходное (а) и восстановленное (б) изображения АС

В 4.4 исследуется взаимосвязь кристаллических и магнитных наноструктур по микроскопическим изображениям образцов тонких пленок $\text{Co} - \text{Sm}$. С использованием вейвлет-фильтрации визуализированы три диапазона микроструктур: более 390 нм – тренд микронного масштаба, (17-390) нм - НЧ наноструктуры и (0.5 – 17) нм - ВЧ наноструктуры. Столбчато-сеточные ВЧ

наноструктуры – одно из условий возникновения перпендикулярной составляющей намагниченности в нанокристаллических пленках Co – Sm. НЧ наноструктуры определяют границы магнитной структуры в данных пленках. Столбчато-сеточные ВЧ и НЧ наноструктуры «стабилизируют» магнитную структуру в данных пленках, например, при термовоздействии.

В 4.5 моделируются изображения оптической микроструктуры термохалинных неоднородностей морской воды и облачного покрова. Для моделирования используются формулы (3) и (4) при $C(u_1, u_2) = 1/(u_1^2 + u_2^2)^{\beta/4}$. Смоделированы анизотропные изображения картин оптической микроструктуры, полученных в лабораторных экспериментах по моделированию турбулентности в стратифицированной по температуре морской воде, когда влияние сил плавучести для неоднородностей с размерами (50-100) мм является определяющим в полном соответствии с условиями экспериментов.

Метод анализа и фрактального моделирования применялся для обработки изображений облачного покрова. С использованием формул (3) и (4) осуществлялась фильтрация изображений облачного покрова, позволяющая компенсировать резкий спад ИЧХ на высоких частотах, который связан с конечным разрешением аппаратуры космической съемки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод моделирования изображений на основе модификации интегральных спектральных характеристик ортогональных преобразований в схеме обобщенной пространственно-частотной фильтрации, при которой сохраняется фаза, либо знак амплитуды соответствующего ортогонального преобразования исходного изображения. Смоделированы изображения, для которых интегральные спектральные характеристики инвариантны относительно мультипликативных изменений масштаба, сдвигов и поворотов смоделированного изображения.
2. Разработан метод моделирования изображений с заданными фрактальными характеристиками на основе обобщенной пространственно-частотной фильтрации и модификации интегральной частотной характеристики модуля амплитуды в убывающую по степенному закону функцию. Для смоделированных изображений построены фрактальные меры в пространственной области, которые инвариантны относительно мультипликативных изменений масштаба. Показано, что если для смоделированных изображений сохраняются интегральные характеристики анизотропии исходного пространственного спектра, то смоделированные изображения обладают максимальным сходством с исходными изображениями.
3. Разработан и исследован метод устранения искажений непериодических наноструктур на изображениях, полученных в системе визуализации электронного микроскопа с дефокусировкой. Метод основан на коррекции распределение фаз преобразования Фурье этого изображения в соответствии с распределением нулей частотной характеристики системы визуализации, а ИЧХ модифицируется в убывающую по степенному закону

функцию. Показано, что данный метод применим для моделирования всей иерархии наноструктур в аморфных сплавах, если образец является тонким, слабофазовым и слабопоглощающим, а отношение коэффициентов амплитудной и фазовой модуляции электронного пучка в образце меньше 0.2.

4. Разработан и исследован метод идентификации спектральных плотностей микроструктур по электронно-микроскопическим изображениям, основанный на аппроксимации ИЧХ суперпозицией спектральных плотностей и последующем моделировании изображений с полученной по результатам аппроксимации ИЧХ. Показано, что для оценивания ИЧХ спектров изображений могут быть использованы преобразование Хартли, Q – преобразование и косинусное преобразование.
5. Разработан комплекс программ, реализующий методы моделирования изображений с использованием алгоритмов обобщенного спектрального анализа, пространственно-частотной, в том числе вейвлет-фильтрации, фрактального анализа и фрактальной фильтрации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Грудин Б.Н., Плотников В.С., Смольянинов Н.А., Пустовалов Е.В., Модин Е.Б. Синтез фрактальных микроскопических изображений // Известия высших учебных заведений. Физика. 2009. № 11. С. 85-91.
2. Грудин Б.Н., Плотников В.С., Смольянинов Н.А., Должиков С.В., Войтенко О.В., Глухов А.П. Фрактальная фильтрация микроскопических изображений // Известия высших учебных заведений. Физика. 2010. № 3/2. С.71-76.
3. Грудин Б.Н., Плотников В.С., Смольянинов Н.А. Моделирование изображений с заданными фрактальными характеристиками // Автометрия. 2010. Т. 46, № 3. С.13-21.
4. Грудин Б.Н., Плотников В.С., Полищук С.В., Смольянинов Н.А. Моделирование и восстановление изображений наноструктур в аморфных сплавах // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2011. Т. 75, №9. С. 1269-1273.
5. Плотников В.С., Грудин Б.Н., Глухов А.П., Смольянинов Н.А. Исследование взаимосвязи кристаллических и магнитных наноструктур в пленках СО-SM методами электронной микроскопии // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2011. Т. 75, №9. С. 1287-1290.
6. Грудин Б.Н., Должиков С.В., Плотников В.С., Смольянинов Н.А., Полищук С.В. Устранение искажений неперiodических микроструктур на изображениях // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2012. Т. 76, №9. С. 1154-1159.
7. Грудин Б.Н., Плотников В.С., Пустовалов Е.В., Смольянинов Н.А., Полищук С.В. Моделирование и анализ изображений с использованием спектральных характеристик // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2012. Т. 76, №9. С. 1160-1165.

8. Грудин Б.Н., Ламаш Б.Е., Плотников В.С., Смольянинов Н.А. Оценивание фрактальной размерности облачного покрова // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2012. №24. С. 54-61.
9. Грудин Б.Н., Плотников В.С., Смольянинов Н.А., Пустовалов Е.В., Модин Е.Б. Модификация спектральных плотностей изображений фрактальных наноструктур // Сборник тезисов II Всероссийской конференции «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях». МИФИ, г. Москва, 2009. С. 119-120.
10. Гарке Д.В., Пустовалов Е.В., Смирнов И.С., Грудин Б.Н., Смольянинов Н.А. Корреляционная микроскопия микроструктурированных и пористых материалов // Сборник тезисов XXIII Российской конференции по электронной микроскопии. Черноголовка, 2010. С. 200.
11. Грудин Б.Н., Ламаш Б.Е., Плотников В.С., Смольянинов Н.А. Моделирование изображений оптической микроструктуры термохалинных неоднородностей морской воды и облачного покрова // Сборник трудов международной конференции «Потоки и структуры в жидкостях: физика геосфер», г. Владивосток, 2011. С. 274-277.
12. Grudin B., Plotnikov V., Pustovalov E., Smol'yaninov N., Polischuk S., Kolesnikov A. Restoration of Microscopic Images of Nanostructures // Proceedings of 5th Congress of the International Union of Microbeam Analysis Societies "Microbeam Analysis for Future Science and Technology". Seoul, Korea, 2011. P. 265.
13. Грудин Б.Н., Плотников В.С., Смольянинов Н.А., Глухов А.П. Модификация спектральных плотностей изображений фрактальных микроструктур(SAF). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2009611650 от 09.06.2009.
14. Грудин Б.Н., Плотников В.С., Смольянинов Н.А., Глухов А.П. Фрактальный анализ и фильтрация изображений микроструктур (FAFIM). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2009611649 от 09.06.2009.
15. Грудин Б.Н., Плотников В.С., Смольянинов Н.А., Кириллов А.В. Моделирование изображений с заданными фрактальными характеристиками (MIF). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2010616324 от 23.09.2010.
16. Грудин Б.Н., Плотников В.С., Смольянинов Н.А., Смирнов И.С. Восстановление изображений наноструктур аморфных сплавов (Miviz). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2010616505 от 01.10.2010.
17. Грудин Б.Н., Плотников В.С., Смольянинов Н.А., Полищук С.В. Восстановление изображений микроструктуры облачного покрова с использованием фрактальной фильтрации (CloFilter). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2012611492 от 08.02.2012.

- 18.Грудин Б.Н., Плотников В.С., Смольянинов Н.А., Полищук С.В. Моделирование изображений облачного покрова (CloModel). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2012611493 от 08.02.2012.
- 19.Грудин Б.Н., Плотников В.С., Смольянинов Н.А., Полищук С.В. Моделирование и анализ микроструктуры с использованием спектральных характеристик (MImage). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2012617388 от 16.08.2012.
- 20.Грудин Б.Н., Плотников В.С., Смольянинов Н.А., Полищук С.В. Устранение искажений непериодических микроструктур на микроскопических изображениях (NDRemoval). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2012617389 от 16.08.2012.

Личный вклад автора.

Все результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. В работах [2, 5-7, 9-11] автором разработаны методы моделирования микроскопических изображений на основе обобщенной фильтрации с использованием модификации интегральных характеристик обобщенных спектров изображений. В работах [1, 3, 4, 8, 12] автором разработаны методы моделирования микроскопических изображений с заданными фрактальными характеристиками. Совместно с соавторами разработан комплекс программ [13-20], реализующий алгоритмы моделирования изображений на основе обобщенного спектрального анализа, пространственно-частотной, в том числе вейвлет-фильтрации, фрактального анализа и фрактальной фильтрации. Результаты, касающиеся электронно-микроскопических исследований, визуализации аморфных, магнитных и термохалинных микроструктур, получены в соавторстве.

Смолянинов Николай Александрович

Моделирование микроскопических изображений на основе анализа и
модификации спектральных характеристик

Автореферат

Подписано к печати 12.02.2013
Формат 60×84/16

Усл. п. л. 1.0
Тираж 100

Уч.-изд. л. 0.8
Заказ 2

Издано ИАПУ ДВО РАН, Владивосток, Радио 5
Отпечатано участком оперативной печати ИАПУ ДВО РАН
Владивосток, Радио, 5