

Напрюшкин Александр Алексеевич

**Алгоритмическое и программное обеспечение
системы интерпретации аэрокосмических
изображений для решения задач картирования
ландшафтных объектов**

05.13.11 — Математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных
сетей

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск — 2002

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Н.Г. Марков**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **А.М. Корилов**

кандидат технических наук **К.Т. Протасов**

Ведущая организация:

Институт вычислительной математики и математической
геофизики СО РАН, г. Новосибирск

Защита состоится « 25 » декабря 2002 г. в 15 ч. в ауд. 214 на заседании диссертационного совета Д 212.269.06 при Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, ул. Советская, 84, институт «Кибернетический центр» ТПУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан « 22 » ноября 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета
к.т.н., доцент



М.А. Сонькин

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Стремительное развитие аэрокосмических технологий в последние 30 лет открыло новые неограниченные возможности оперативного получения различной пространственной информации методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Это обстоятельство обуславливает интенсификацию использования данных ДЗЗ для проведения ландшафтного мониторинга при решении различных задач рационального природопользования. Комплексное решение таких задач возможно при совместном использовании технологий ландшафтного тематического картирования территорий по аэрокосмическим изображениям (АКИ) и современных геоинформационных систем (ГИС), предоставляющих развитые средства хранения и пространственного анализа картографической информации. Увеличение объема поступающей аэрокосмической информации, используемой для создания и актуализации ландшафтных тематических карт в ГИС, а также повышение требований к скорости ее обработки обуславливают необходимость развития средств автоматизации процесса интерпретации (дешифрирования) данных ДЗЗ.

Состояние проблемы автоматизированной интерпретации АКИ показывает, что данное направление до сих пор остается наиболее сложным и наименее проработанным. Среди основных задач автоматизированной интерпретации данных ДЗЗ следует выделить задачу синтеза эффективных методов и алгоритмов распознавания объектов на АКИ. Проблемам распознавания объектов (образов) посвящены многочисленные работы ученых: С.А. Айвазяна, В.Н. Вапника, А.Л. Горелика, А.В. Лапко, К.Т. Протасова, Л.А. Заде, Д. Ландгрэбэ, А. Розенфельда, Д. Ричардса, К. Фукунаги, Р. Харалика и др.

Распространенные системы обработки и интерпретации данных ДЗЗ не позволяют решить задачу автоматизированной интерпретации АКИ в целом. Во-первых, наиболее эффективные подходы к синтезу методов и алгоритмов распознавания, реализованные в таких системах, базируются, главным образом, на использовании принципов параметрической статистики и описания классов ландшафтных объектов вероятностными моделями с предположением о нормальной плотности распределения признаков в распознаваемых классах. На практике такое предположение во многих случаях не справедливо, что обуславливает снижение эффективности параметрических методов. Перспективным направлением является развитие непараметрического подхода к распознаванию ландшафтных объектов, хотя в рамках данного подхода необходимо уделять внимание повышению вычислительной эффективности непараметрических методов и алгоритмов распознавания. Во-вторых, традиционные методы и алгоритмы распознавания АКИ часто основываются на рассмотрении лишь спектральных характеристик АКИ, что не всегда эффективно при различении спектрально похожих объектов. Подходы, учитывающие также другие характеристики объектов при распознавании базируются, главным образом, на использовании дополнительных данных об интерпретируемой ландшафтной сцене, однако, такие данные не всегда доступны. Перспективным подходом, но недостаточно развитым применительно к АКИ оптического диапазона, является использование теории машин-

ного зрения и текстурного анализа для получения дополнительной информации о распознаваемых объектах, помогающей улучшить их различимость.

Все вышесказанное говорит об актуальности проблем модификации существующих и разработки новых методов и алгоритмов интерпретации данных ДЗЗ, а также создания на их основе систем автоматизированной интерпретации АКИ, позволяющих эффективно решать задачи ландшафтного тематического картирования.

Исследования и разработки по теме проводились в соответствии с утвержденными планами НИР Кибернетического центра ТПУ в 1997-2002 гг., а также в рамках проекта Минпромнауки РФ по гранту №00-15-98478 поддержки ведущих научных школ, проектов РФФИ по грантам №00-07-90124, №01-07-06009, №02-07-06005 и НИР по гранту аспиранта ТПУ 2002г.

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является создание алгоритмического и программного обеспечения системы автоматизированной интерпретации аэрокосмических изображений, позволяющей решать задачи тематического картирования ландшафтных объектов с использованием данных ДЗЗ.

Для реализации поставленной цели необходимо последовательное решение следующих задач:

1. Создание концепции автоматизированной интерпретации аэрокосмических изображений. При этом должны быть определены базовые принципы распознавания ландшафтных объектов, а также принципы построения автоматизированной системы интерпретации.

2. Разработка математического обеспечения (методов и алгоритмов) системы автоматизированной интерпретации аэрокосмических изображений. Решение данной задачи предполагает также исследование эффективности предлагаемых методов и алгоритмов.

3. Разработка программного обеспечения системы автоматизированной интерпретации аэрокосмических изображений. Результатом решения этой задачи должны явиться программные средства такой системы, реализующие сформулированную концепцию и разработанные методы и алгоритмы.

4. Апробация разработанной системы автоматизированной интерпретации аэрокосмических изображений на примере решения прикладной задачи ландшафтно-экологического картирования.

Методы исследований. В работе использованы методы многомерного статистического анализа, теории распознавания образов, статистического моделирования. Проверка работоспособности и эффективности адаптивной процедуры распознавания и положенных в ее основу алгоритмов, а также оценка достоверности полученных при этом результатов осуществлялись путем проведения численных экспериментов с использованием модельных данных и реальных космических снимков с различными характеристиками.

Научную новизну полученных в работе результатов определяют:

1. Концепция автоматизированной интерпретации аэрокосмических изображений, включающая основные принципы распознавания ландшафтных объектов.

2. Двухэтапный метод классификации аэрокосмических изображений с расширенной системой признаков и реализующий его итерационный алгоритм.

3. Алгоритм классификации аэрокосмических изображений с непараметрической оценкой условных плотностей распределения признаков.

4. Адаптивная процедура распознавания ландшафтных объектов, использующая расширенную систему признаков и адаптивное решающее правило выбора наиболее эффективного алгоритма классификации.

5. Результаты исследования эффективности адаптивной процедуры распознавания и положенных в ее основу алгоритмов классификации.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Практически значимыми являются созданные методы, алгоритмы и программные средства системы автоматизированной интерпретации аэрокосмических изображений «LandMapper» для решения задач картирования ландшафтных объектов. Также практически ценными являются разработанное программное обеспечение для создания модельных изображений с различными статистическими характеристиками, позволяющих проводить исследование эффективности алгоритмов классификации, и сами модельные изображения. Программные средства системы «LandMapper» функционируют на компьютерах типа IBM PC под управлением операционной системы Windows 98/NT. Объем исходного кода системы составляет более 15000 строк на языках C++ и MapBasic.

Созданные программные средства были апробированы при решении задачи ландшафтно-экологического картирования Первомайского нефтяного месторождения (Томская область). Полученные в ходе решения данной задачи результаты и алгоритмическое и программное обеспечение системы «LandMapper» внедрены в «ТомскНИПИнефть ВНК» – дочернем предприятии ЗАО ИЦ «Юкос». Внедрение подтверждено соответствующим актом.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Итерационный алгоритм, реализующий предложенный двухэтапный метод классификации аэрокосмических изображений с расширенной системой признаков, позволяет улучшать точность распознавания ландшафтных объектов.

2. Алгоритм классификации с непараметрической оценкой плотности распределения признаков имеет высокую вычислительную эффективность по сравнению с традиционными непараметрическими алгоритмами классификации.

3. Адаптивная процедура распознавания ландшафтных объектов, использующая итерационный алгоритм классификации и адаптивное решающее правило, позволяет повысить эффективность распознавания ландшафтных объектов на мультиспектральных и панхроматических аэрокосмических изображениях.

4. Разработанные алгоритмические и программные средства системы автоматизированной интерпретации аэрокосмических изображений позволяют эффективно решать задачу создания ландшафтных тематических карт с использованием данных дистанционного зондирования Земли.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах: III Российско-Корейский международный симпозиум по науке и технологии «Korus'99» (г. Новосибирск, 1999 г.), Международная конференция «ГИС для оптимизации природопользо-

вания в целях устойчивого развития территорий (Интеркарто-5)» (г. Якутск, 1999 г.), International Symposium «Geomark 2000» (Paris, France, 2000), The 3rd AGILE Conference on Geographic Information Science (Helsinki, Finland, 2000), The 4th Historical Cities Sustainable Development Conference: “The GIS as Design and Management Support” HISTOCITY 2000 (Sevilla, Spain, 2000), The 4th AGILE Conference on Geographic Information Science (Brno, Czech Republic, 2001), V Российско-Корейский международный симпозиум по науке и технологии «Korus’2001» (г. Томск, 2001 г.), III Международная конференция по науке и информационным технологиям «CSIT 2001» (г. Уфа, 2001 г.), International workshop on Urban Planning «Historical centers and territories: Theories, Methods and Applications» (Cagliari, Italy, 2001), The 5th AGILE Conference on Geographic Information Science (Palma de Mallorca, Spain, 2002), Русско-американский семинар «Studies of Socio-Natural Co-Evolution from Different Parts of the World» (г. Новосибирск, 2002 г.), The 9-th International Symposium on Remote Sensing «Remote Sensing 2002» (Agia Pelagia, Greece, 2002).

По результатам работы имеется 12 публикаций, в том числе 9 статей.

Личный вклад:

1. В публикациях [1,4,7,9,12] постановка задач исследования и разработка концепции автоматизированной интерпретации аэрокосмических изображений выполнены автором совместно с Н.Г. Марковым.

2. В работах [2,3,5,7,9,12] алгоритмическое обеспечение системы автоматизированной интерпретации аэрокосмических изображений для решения задач картирования ландшафтных объектов разработано лично автором.

3. В публикациях [9,12] разработка моделей изображений для исследования эффективности предложенных алгоритмов выполнена автором.

4. В работах [6,8-12] постановки задач исследования эффективности предложенных алгоритмов классификации и адаптивной процедуры распознавания выполнены автором с Н.Г. Марковым. Результаты исследования алгоритмов классификации и адаптивной процедуры распознавания получены автором, при этом результаты сравнительного анализа непараметрических статистических алгоритмов классификации с нейросетевыми алгоритмами получены совместно с А.В. Замятиным и Д.Г. Бадмаевым [6,8,10].

5. Разработка программного обеспечения системы автоматизированной интерпретации аэрокосмических изображений «LandMapper» для решения задач картирования ландшафтных объектов выполнена автором совместно с Е.В. Вертинской, Р.В. Ковиным, А.А. Захаровой [2,3,12], при этом подсистема визуализации растровых данных, модули импорта/экспорта данных, подсистема векторизации растровых данных и подсистема тематической обработки, за исключением модуля анализа информативности, разработаны лично автором.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 101 наименования и приложения. Объем основного текста диссертации составляет 136 страниц машинописного текста, иллюстрированного 57 рисунками и 8 таблицами.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность работы в данном научном направлении, формулируются цель и задачи исследования, приводится краткое содержание работы по главам.

В первой главе раскрываются особенности ландшафтного мониторинга экосистем, рассматриваются основные классы задач ландшафтного тематического картирования по данным ландшафтного мониторинга, показывается роль методов дистанционного зондирования в решении этих задач. Приводится описание основных существующих на сегодняшний день систем ДЗЗ, а также характеристик предоставляемых ими данных. Раскрывается содержание задач обработки и интерпретации АКИ при ландшафтном тематическом картировании и формулируется проблема автоматизации интерпретации АКИ для решения задач такого картирования.

Показывается, что существующие подходы к решению проблемы автоматизации интерпретации АКИ сводятся, главным образом, к применению традиционной теории *распознавания образов*. В основе синтеза методов распознавания образов (объектов) на изображении лежат принципы *контролируемой* (с обучением) *классификации*. В процессе распознавания объектов с помощью методов контролируемой классификации выделяются этап формирования системы признаков и этап непосредственно классификации.

При реализации первого этапа традиционным подходом является использование спектральной системы признаков, когда в качестве объектов выступают отдельные пиксели АКИ, заданные P -мерными векторами $X = \{x_v, v = \overline{1, P}\}$ значений яркости в каждой зоне спектра (P – количество спектральных диапазонов). Эффективность данного подхода зачастую ограничена перекрытием кривых спектральной яркости разнотипных объектов ландшафтной поверхности в различных диапазонах спектра, что делает невозможным их разделение (классификацию) с использованием спектральных признаков.

В анализируемых работах предлагаются различные подходы к формированию системы признаков для улучшения качества классификации, среди которых можно выделить методологию интеграции данных, использование баз знаний, контекстную классификацию. В соответствии с первым подходом улучшение классификации достигается путем использования дополнительной геоинформации (карт почвенного и растительного покровов, карт районирования территории, данных полевых измерений и т.д.) при принятии классификационных решений, помогающей улучшить разделимость классифицируемых объектов. К сожалению, такая геоинформация не всегда доступна, что снижает практическую ценность данного подхода. Второй подход подразумевает использование при классификации баз знаний, содержащих наборы информативных признаков ландшафтных объектов и правил их классификации. Однако универсальной схемы классификации АКИ с использованием баз знаний на сегодняшний день не предложено, и эффективность данного подхода обычно весьма ограничена рамками решаемой прикладной задачи. В основе третьего подхода лежат принципы контекстной классификации, позволяющей учитывать характеристики простран-

ственного распределения пикселей распознаваемых объектов (контекста) при их классификации. Среди основных направлений развития этого подхода можно отметить использование методов предварительной фильтрации изображения, вероятностной релаксации и текстурного анализа. Показано, что перспективным, но недостаточно развитым применительно к АКИ оптического диапазона, является использование методов текстурного анализа для получения дополнительной информации о распознаваемых объектах на изображении, помогающей улучшить различимость объектов. Предлагается провести исследование возможностей метода текстурного анализа для получения дополнительной информации о распознаваемых ландшафтных объектах.

Для реализации этапа классификации в процессе распознавания объектов могут быть использованы три группы методов – статистические методы, методы нечеткой логики и методы искусственного интеллекта (искусственных нейронных сетей). На сегодняшний день наибольшее распространение получили методы статистической контролируемой классификации, как наиболее перспективные. Так в известных системах обработки и интерпретации данных ДЗЗ, таких как ER Mapper (Earth Resource Mapping), Idrisi 32 (Clark University), ERDAS Imagine (ERDAS), TNT MIPS (Micro Images), представлены обучаемые классификаторы по критериям наименьшего расстояния в различных метриках (Евклида, Махаланобиса, Фишера и т.д.), максимального правдоподобия (Байеса), параллелепипеда и т.д. В основу таких классификаторов положено использование различных критериев расстояния, принципов *параметрической статистики* и т.д. К сожалению, эффективность этих методов зачастую ограничена либо простотой используемых критериев классификации, либо предположением о нормальности условных плотностей распределении (УПР) векторов признаков классифицируемых объектов, что не всегда справедливо для реальных АКИ. Поэтому в настоящее время с увеличением производительности компьютерных систем возрастает интерес к *непараметрическому* подходу при синтезе статистических методов классификации, развитие которого долгое время сдерживалось проблемой вычислительной сложности. В работе предлагается использовать и развивать непараметрический подход к оценке УПР при синтезе статистических методов классификации.

На основе результатов анализа проблемы автоматизации интерпретации АКИ для решения задач ландшафтного тематического картирования формулируются цель и задачи исследований в рамках диссертационной работы.

Во второй главе рассматривается предлагаемая концепция автоматизированной интерпретации АКИ. Формулируются ее основные принципы:

1. При распознавании ландшафтных объектов на АКИ должна использоваться расширенная система признаков (РСП), позволяющая учитывать при классификации различные спектральные и пространственные свойства распознаваемых ландшафтных объектов.

2. Формирование РСП должно производиться с учетом критерия информативности положенных в ее основу признаков.

3. В процедуре распознавания ландшафтных объектов на АКИ необходимо реализовать несколько классификационных алгоритмов и адаптивное решающее

правило, позволяющее выбирать при классификации один из этих алгоритмов на основе заданных критериев эффективности.

4. Необходимо обеспечение возможности оценки критериев эффективности классификационных алгоритмов как по тестовым, так и по обучающим данным. При этом для оценки эффективности по обучающим данным следует использовать метод кроссвалидации («скользящего контроля»).

Предлагается концептуальная схема процесса автоматизированной интерпретации АКИ, основными этапами которой являются предварительная обработка, тематическая обработка (непосредственно интерпретация), а также векторизация полученной растровой тематической карты с целью дальнейшей работы с ней в векторной ГИС. Особенностью концептуальной схемы является более высокий уровень автоматизации этапа тематической обработки АКИ по сравнению с традиционной схемой за счет использования адаптивной процедуры распознавания.

Рассматривается методика построения обучающих выборок и оценки их эффективности с использованием кластерного анализа, визуальных и численных средств оценки разделимости по критерию информативности Джеффри-Мацушита.

Предлагается двухэтапный метод классификации АКИ с расширенной системой признаков (РСП), суть которого заключается в следующем. По исходному АКИ формируется РСП, состоящая из текстурной (ТК) $X^{TX} = \{T_1, T_2, \dots, T_S\}$ и спектральной (СК) $X^{SP} = \{I_1, I_2, \dots, I_K\}$ компонент. СК РСП представляет собой спектральную признаковую систему АКИ и характеризует спектральные свойства ландшафтных объектов. ТК РСП формируется по спектральным каналам исходного АКИ методом текстурного анализа и отражает пространственные свойства АКИ. Для реализации классификации с РСП в рамках предлагаемого метода предлагается использовать *принцип раздельной обработки* ТК и СК, подразумевающий проведение классификации за два этапа. На первом этапе производится классификация только текстурных составляющих РСП $X^{TX} = \{T_1, T_2, \dots, T_S\}$ с получением результата в виде вероятностных карт, используемых на втором этапе классификации в пространстве признаков СК $X^{SP} = \{I_1, I_2, \dots, I_K\}$ в качестве априорных вероятностей. Принцип раздельной обработки позволяет преодолеть недостатки использования традиционного подхода к формированию признаковых векторов РСП *по принципу конкатенации* в виде $X = \{I_1, I_2, \dots, I_K, T_1, T_2, \dots, T_S\}$, применяемого в методологии интеграции данных и ведущем к появлению эффекта ухудшения пространственного разрешения (размывания мелких деталей тематической карты).

Для увеличения вычислительной эффективности метода классификации с РСП решается задача анализа информативности и оптимизации РСП методом выбора значимых признаков, использующим принцип усеченного перебора и оценку критерия информативности Джеффри-Мацушита.

Опишем подробнее этап формирования ТК РСП. Исходное изображение можно описать дискретной функцией яркости $I(i, j)$, причем $0 \leq I(i, j) \leq L$, где L – количество градаций яркости изображения (обычно $L=255$) и (i, j) – соответ-

венно позиция пикселя по строке и столбцу изображения. Численные оценки свойств текстуры зависят от размера окрестности W пикселя (i, j) изображения $I(i, j)$, в которой они определяются, и представляют собой *текстурные признаки* данного пикселя. Текстурные признаки могут быть описаны статистическими моментами пространственных распределений, вычисляемыми как меры однородности по одномерной гистограмме значений сигналов (учитывающих групповые свойства пикселей) и по двумерным гистограммам значений сигналов (учитывающих взаимное расположение пикселей). В качестве численных оценок текстуры по одномерной гистограмме для формирования ТК РСП используются следующие статистические характеристики:

$$T_{mom1}^k = n^{-2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [I(i, j)]^k - k\text{-й начальный момент}; \quad (1)$$

$$T_{ent1} = - \sum_{g=0}^{L-1} F(g) \log_{10} F(g) - \text{Энтропия}, \quad (2)$$

где n - размер скользящего окна ($n = 2W + 1$) в пикселях, $F(g)$ - частота пикселя с яркостью g .

Текстурные оценки, учитывающие взаимное расположение пикселей внутри скользящего окна, строятся на свойствах двумерных гистограмм частот совместных значений яркости пар элементов изображения, описываемыми так называемыми матрицами смежности $\|F(g, l)\|$ (МС). Элементы МС $\|F(g, l)\|$ представляют собой значения частот, с которыми пары пикселей (один с яркостью g и позицией (i, j) и другой с яркостью l и позицией (k, h)), отстоящие на расстоянии r и в направлении θ , встречаются в области скользящего окна.

Для формирования текстурных признаков ТК РСП, вычисляемых на основе МС, используются следующие статистические характеристики:

$$T_{enr2} = \sum_{g=0}^{L-1} \sum_{l=0}^{L-1} [F(g, l)]^2 - \text{Энергия}; \quad (3)$$

$$T_{hmg2} = \sum_{g=0}^{L-1} \sum_{l=0}^{L-1} F(g, l) / (1 + |g - l|) - \text{Однородность}, \quad (4)$$

где $F(g, l)$ – частота появления двух пикселей в скользящем окне с яркостью g и l под углом θ на расстоянии r .

Формирование ТК РСП выполняется путем сканирования раstra изображения $I(i, j)$ строка за строкой скользящим окном размера $(2W+1) \times (2W+1)$ и вычисления для каждого пикселя (i, j) текстурных оценок (1)-(4) с сохранением результата в наборах текстурных карт, учитывающих пространственное распределение пикселей изображения.

Рассматриваются детерминированные и вероятностные решающие правила классификации (РПК), использующие в качестве критерия оптимальности классификации критерии расстояний, граничных условий, определенных в различных метриках, а также вероятность ошибочного распознавания. Предлагается *адаптивное решающее правило*, позволяющее объединить достоинства рассмотренных РПК путем их альтернативного использования при классификации АКИ.

В адаптивном правиле предполагается альтернативное использование трех видов дискриминантных функций $\phi = \{\phi^1(X), \phi^2(X), \phi^3(X)\}$, соответствующих байесовскому РПК с гауссовской оценкой УПР (БПГ), байесовскому РПК с непараметрической оценкой УПР Розенблатта-Парзена (БПРП) и РПК наименьшего расстояния (ПНР), представляемых следующими выражениями:

$$\phi_i^1(X) = \ln p(\omega_i) - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_i| - \frac{1}{2} (X - \mu_i)^t \Sigma_i^{-1} (X - \mu_i), \quad (5)$$

$$\phi_i^2(X) = p(\omega_i) \left(n_i \prod_{v=1}^P c_v \right)^{-1} \sum_{s=1}^{n_i} \prod_{v=1}^P \Phi \left(\frac{x_v - x_v^s}{c_v} \right), \quad (6)$$

$$\phi_i^3(X) = -d(X, \mu_i)^2, \quad i = \overline{1, M}, \quad (7)$$

где $p(\omega_i)$ – априорная вероятность принадлежности образа X классу ω_i , μ_i – вектор средних класса ω_i , Σ_i – ковариационная матрица класса ω_i , n_i – количество наблюдений в выборке V_i класса ω_i , P – количество признаков каналов изображения, c_v – сглаживающие параметры, $\Phi(u)$ – ядерная функция оценки плотности распределения, $d(X, \mu_i)^2$ – квадрат расстояния от классифицируемого образа X до центра класса ω_i в заданной метрике, M – количество классов.

В качестве ядерных функций $\Phi(u)$ при восстановлении функции плотности распределения используется нормальное гауссовское ядро. Оценка сглаживающих параметров c_v осуществляется согласно следующему выражению

$$c_v^i = 0.5 \sigma_v^i n_i^{-1/5}, \quad v = \overline{1, P}, \quad i = \overline{1, M}, \quad (8)$$

где $\sigma_v^i = \sqrt{\Sigma_{vv}^i}$ – среднеквадратичное отклонение признака x_v в классе ω_i .

Качество классификации, доставляемое каждой из дискриминантных функций (5)-(7) набора $\{\phi^1(X), \phi^2(X), \phi^3(X)\}$, можно определить из оценки среднего эмпирического риска ложного распознавания по тестовой выборке $V' = \{V'_i, i = \overline{1, M}\}$

$$\bar{R}(\phi(X)) = \sum_{i=1}^M \frac{q_i}{n'_i} \sum_{j=1}^{n'_i} \chi \{i = \arg \max_{k=\overline{1, M}} \phi_k(X^j)\}, \quad (9)$$

где q_i ($i = \overline{1, M}$) – весовой коэффициент класса ω_i (априорная вероятность для БПГ и БПРП), n'_i – количество образов в тестовой выборке V'_i класса ω_i , $\chi\{\cdot\}$ – характеристическая функция $\{0 - \text{«истина»}, 1 - \text{«ложь»}\}$.

Пусть $\phi^*(X)$ – наиболее эффективное РПК, тогда адаптивное решающее правило $m(\phi^*(X))$ можно выразить следующим образом

$$m(\phi^*(X)): \quad \phi^*(X) = \arg \min_{i=\overline{1,3}} \bar{R}(\phi^i(X)). \quad (10)$$

Адаптивное решающее правило (10) позволяет выбрать наилучшее РПК $\phi^*(X)$ по заданному критерию точности из набора соответствующих дискриминантных функций $\{\phi^1(X), \phi^2(X), \phi^3(X)\}$. При этом в случае различия значений критерия точности для пары дискриминантных функций на незначительную величину (погрешность ε) адаптивное решающее правило осуществляет выбор

РПК $\phi^*(X)$ по критерию наименьшей вычислительной сложности, где вычислительная сложность РПК определяется временем расчета критерия (9). В виде критерия точности классификации, используемого в адаптивном решающем правиле (10), кроме среднего эмпирического риска $\bar{R}(\phi(X))$ может выступать также критерий $\bar{K} = 1 - \kappa$, где κ – Каппа индекс согласия (КИС), вычисляемый по тестовой выборке $V' = \{V'_i, i = \overline{1, M}\}$ и показывающий насколько точность полученной классификации тестовой выборки выше, чем точность ее абсолютно случайной классификации.

Использование адаптивного решающего правила (10) в процедуре распознавания позволяет выявлять наиболее эффективное РПК $\phi_i^*(X)$ для интерпретации АКИ с различными характеристиками, и, таким образом, «адаптироваться» ко входным данным для получения наиболее точных результатов распознавания.

Формулируются основные требования к системе автоматизированной интерпретации АКИ, а также определяются базовые принципы ее построения.

Третья глава посвящена разработке алгоритмического обеспечения проектируемой системы автоматизированной интерпретации АКИ.

Разработан алгоритм итерационной классификации АКИ с использованием РСП, основанный на предложенном в главе 2 двухэтапном методе и позволяющий преодолеть недостатки использования традиционного подхода к формированию РСП по принципу конкатенации. Особенностью алгоритма является использование при формировании ТК РСП нескольких текстурных признаков наборов, вычисляемых в скользящих окнах различного размера и образующих разномасштабные составляющие ТК РСП. Таким образом, на этапе классификации ТК РСП алгоритм в итеративном режиме выполняет раздельную классификацию разномасштабных текстурных признаков наборов, передавая на каждой итерации результаты классификации признакового набора, вычисленного в более крупном скользящем окне, в виде вероятностных карт на следующую итерацию классификации признакового набора более мелкого масштаба. На последней итерации алгоритм выполняет классификацию СК РСП с учетом вероятностных карт, полученных в ходе классификации ТК РСП. Можно выделить два основных достоинства этого алгоритма. Во-первых, его использование не ведет к появлению эффекта ухудшения пространственного разрешения конечной тематической карты, т.е. его эффективность высока как при распознавании крупных площадных ландшафтных объектов, так и при распознавании детальных элементов интерпретируемой сцены. Во-вторых, он позволяет учитывать текстурную регулярность ландшафтных объектов одновременно в разных масштабах.

Предлагается непараметрический алгоритм классификации АКИ, использующий байесовское решающее правило с непараметрической оценкой УПР признаков в распознаваемых классах и независимый от вида оцениваемых плотностей. В основу алгоритма положена оригинальная *процедура опережающего вычисления ядерных функций*. Идея процедуры основывается на использовании принципа исключения сложных повторяющихся операций вычисления ядерных функций $\Phi(u)$ в ходе восстановления УПР в каждой ν -й компоненте многомерного признакового вектора $X = \{x_\nu, \nu = \overline{1, P}\}$ в (6) путем буферизации уже однажды

вычисленных значений этих функций. Кратко опишем основные шаги непараметрического алгоритма классификации АКИ.

На *первом шаге* производится расчет сглаживающих параметров c_v ($v = \overline{1, P}$) согласно выражению (8) для всех обучающих выборок изображения. Далее на *втором шаге* выполняется процедура опережающего вычисления ядерных функций с формированием буфера $A = \{A_i, i = \overline{1, M}\}$. Далее классификационный алгоритм выполняет проход всех пикселей изображения (циклы перебора пикселей по строкам и столбцам активизируются на *третьем* и *четвертом шагах* соответственно). *Шаги пять и шесть* составляют этап исключения из рассмотрения легко классифицируемых пикселей. На этом этапе осуществляется попытка классификации текущего признакового вектора X быстрым РПК параллелепипеда. Если X попадает в область определения УПР только одного из классов алфавита $\{\omega_i, i = \overline{1, M}\}$, то X назначается этому классу и классификация X считается успешной. В противном случае осуществляется переход к более сложной классификации с использованием дискриминантной функции (6) с непараметрической оценкой УПР. С *седьмого по одиннадцатый шаг* алгоритм определяет номер класса с максимальной дискриминантной функцией, к которому и назначается вектор X . При этом для оценки УПР по каждой из обучающих выборок V_i используются предварительно вычисленные значения ядерных функций из буфера A_i ($i = \overline{1, M}$). На *заключительном двенадцатом шаге* алгоритм осуществляет запись полученной классификационной метки в результирующий файл тематической карты и переходит к классификации следующего вектора X .

Непараметрический алгоритм классификации АКИ, сохраняя присущее непараметрическим алгоритмам свойство независимости от вида УПР, обладает при этом улучшенной вычислительной эффективностью за счет использования оригинальной процедуры опережающего вычисления ядерных функций и комбинированного РПК, позволяющего не восстанавливать УПР для однозначно классифицируемых векторов X .

Разработана итеративная адаптивная процедура распознавания (АПР) ландшафтных объектов на АКИ, основанная на предложенных алгоритмах (рис.1). АПР использует РСП и адаптивное решающее правило, позволяющее на каждой итерации выбирать наиболее эффективный алгоритм классификации изображения по эмпирическим критериям точности и вычислительной сложности.

Формулируются принципы построения статистических модельных изображений с заданными характеристиками УПР, моделируемых смесями многомерных нормальных распределений и равномерным распределением. Описываются созданные с учетом сформулированных принципов статистические модельные изображения, имеющие уни- и бимодальные УПР.

Проведено исследование эффективности АПР и положенных в ее основу алгоритмов классификации на оригинальных модельных изображениях и реальных космических снимках систем ДЗЗ LANDSAT, SPOT, РЕСУРС-О1. Показана большая эффективность непараметрического алгоритма с БПРП по сравнению с непараметрическим нейросетевым алгоритмом классификации на основе многослойного персептрона.

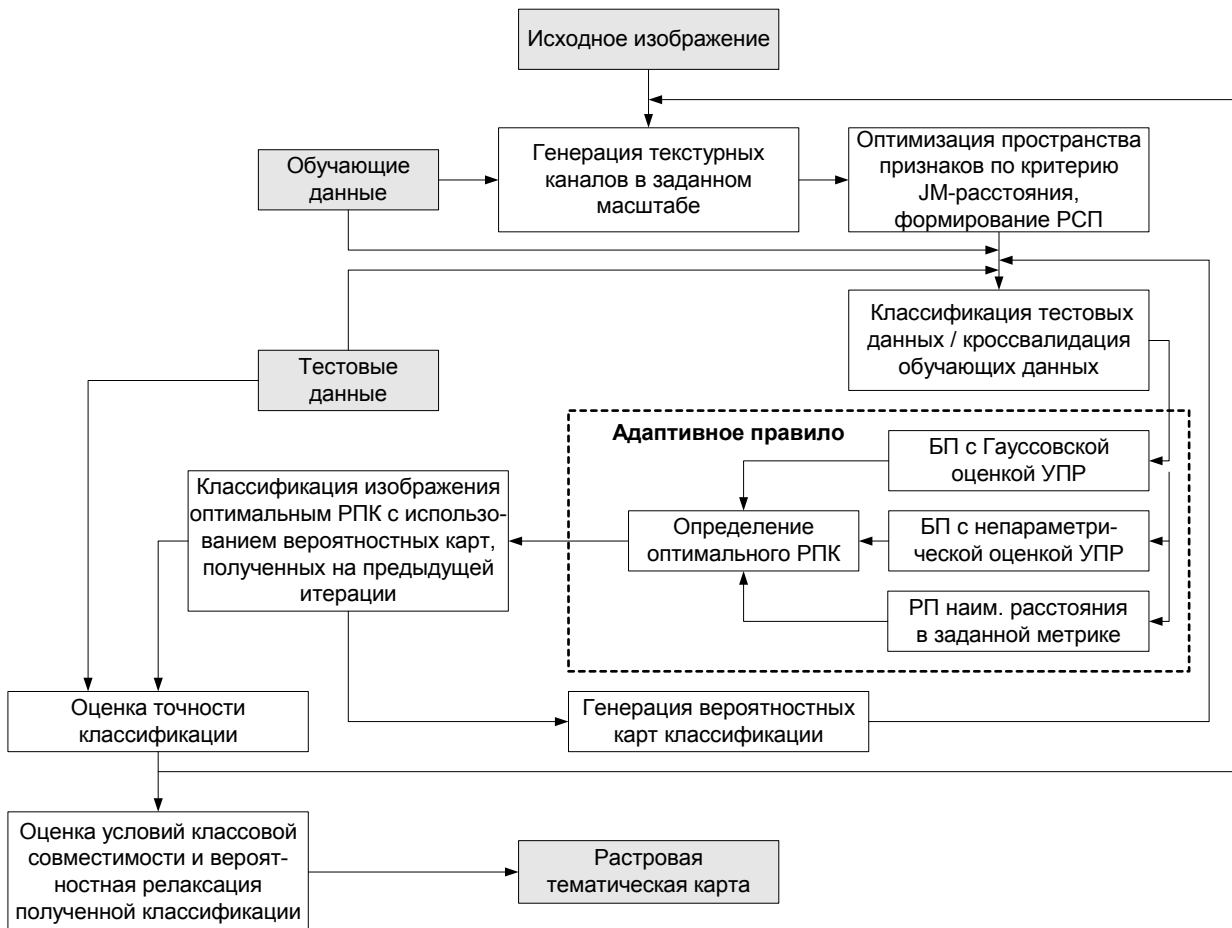


Рис.1. Функциональная схема АПР

Некоторые результаты исследования алгоритмов с различными РПК (ПНР в различных метриках, БПГ и БПРП) на модельных изображениях с уни- и бимодальными УПР приведены на рис.2а и рис.2б. Для ПНР использовались метрики Евклидова (ПЕ) и СКО-нормированного (ПН) расстояний, а также расстояний Махаланобиса (ПМ) и Фишера (ПФ). Результаты исследования эффективности АПР на примере интерпретации панхроматического снимка системы ДЗЗ SPOT (камера HRV – PAN) приведены на рис.3 (визуальная оценка) и рис.4 (численная оценка точности по классам с1-с8 и интегральная оценка КИС).

По результатам исследования сделаны выводы, что: 1) непараметрический алгоритм классификации АКИ (БПРП) с использованием оригинальной процедуры опережающего вычисления ядерных функций позволяет повысить вычислительную эффективность классификации в 9-11 раз по сравнению с процедурой прямого счета независимо от характеристик интерпретируемого АКИ, 2) различные классификационные алгоритмы показывают разные показатели точности и вычислительной сложности в зависимости от характеристик изображения, что делает целесообразным их совместное использование в АПР, 3) использование при классификации РСР и адаптивного решающего правила является довольно эффективным подходом к улучшению точности классификации как мультиспектральных, так и панхроматических АКИ.

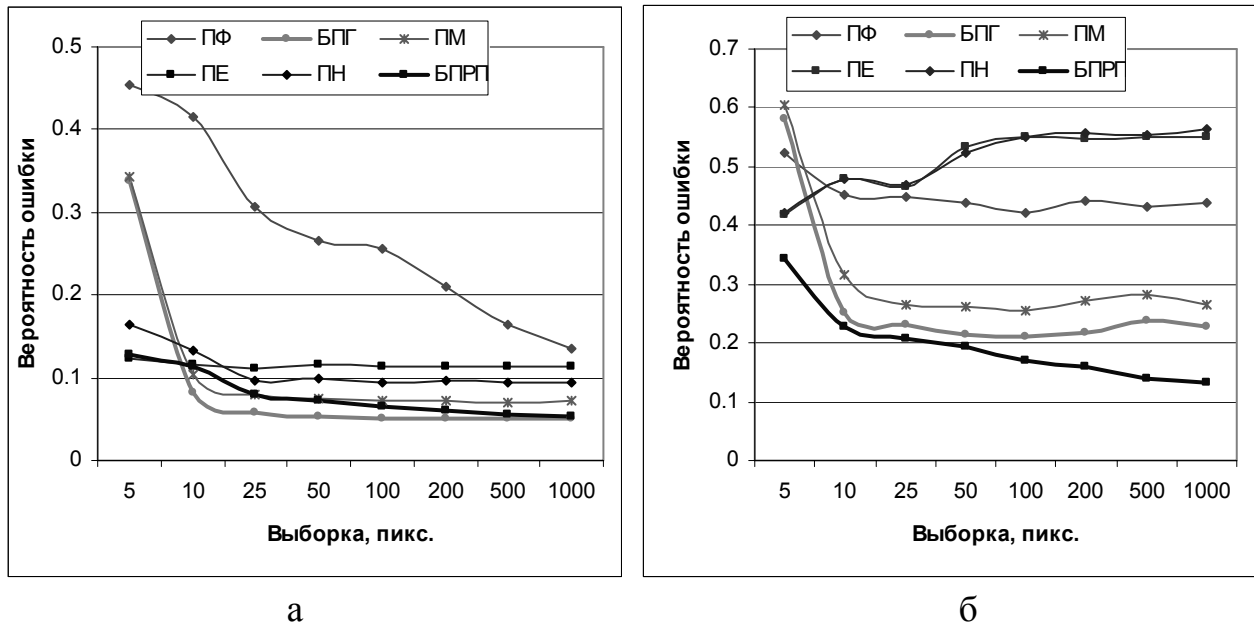


Рис. 2. Вероятность ошибки распознавания объектов на модельных изображениях алгоритмами с различными РПК в зависимости от объема выборки; а – с унимодальными УПР; б – с бимодальными УПР

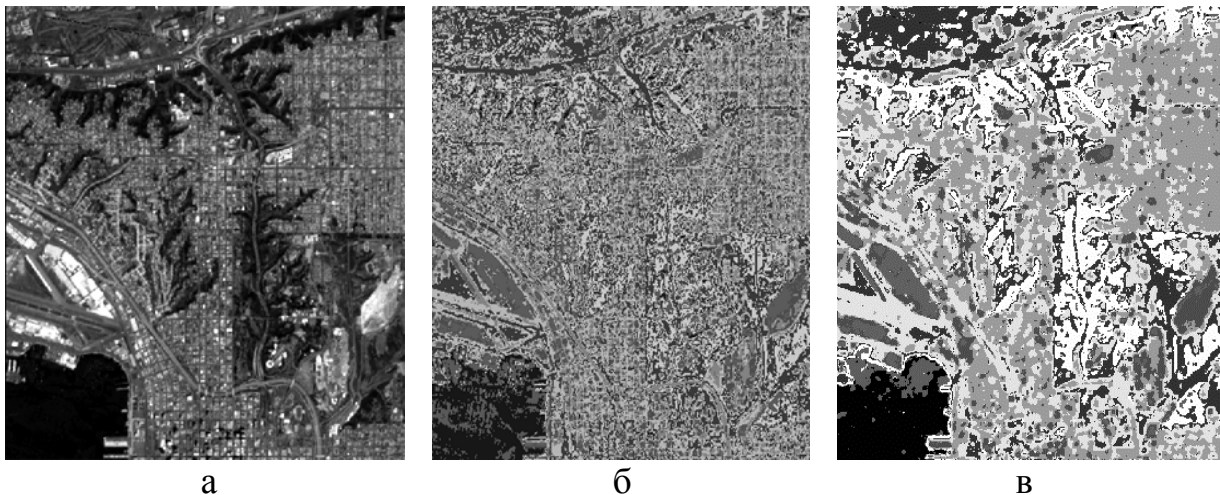


Рис. 3. Результаты интерпретации панхроматического космического изображения SPOT HRV (PAN); а – исходное изображение; б – классификация с БПГ; в – классификация с использованием АПР

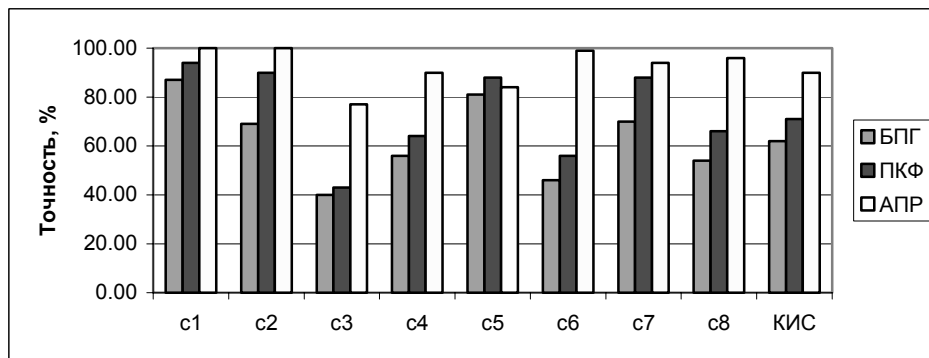


Рис.4. Оценка точности классификации по различным классам изображения алгоритмом с БПГ, БПГ с постфильтрацией результата (ПКФ), АПР

В главе четыре описывается программное обеспечение системы автоматизированной интерпретации АКИ и приводятся результаты апробации системы при решении практической задачи ландшафтно-экологического картирования.

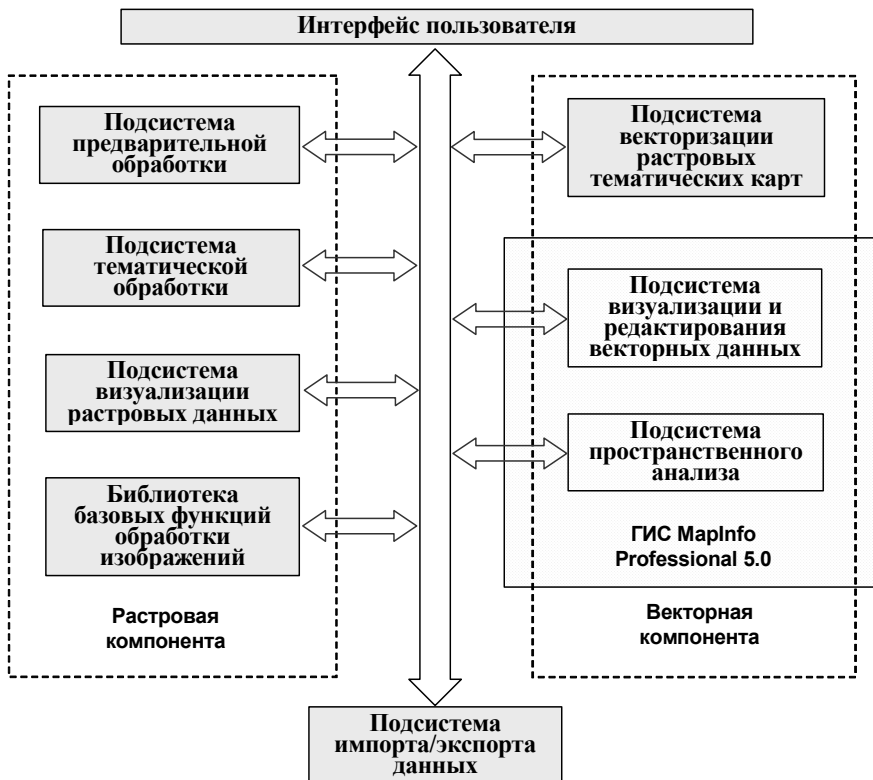


Рис.4. Увеличенная структура программного обеспечения системы «LandMapper»

ции, предварительной и тематической обработки (интерпретации) изображений, в составе ВК – подсистема векторизации растровых тематических карт (выделено серым). Подсистемы пространственного анализа, визуализации и редактирования векторных данных реализуются средствами ГИС MapInfo Professional 5.0.

Приводятся результаты апробации разработанной системы «LandMapper» на примере решения задачи ландшафтно-экологического картирования территории Первомайского нефтяного месторождения (Томская область) по космическому снимку РЕСУРС-О1 (камера МСУ-Э). Показаны оценки численных характеристик ландшафтных объектов на основе созданной карты месторождения.

Полученная в результате тематической обработки растровая ландшафтно-экологическая карта Первомайского месторождения была векторизована в автоматическом режиме и оформлена в виде векторной тематической карты средствами подсистемы векторизации растровых тематических карт. Фрагмент векторной ландшафтно-экологической карты (масштаба 1:300000) и соответствующая ей легенда приведены на рис.6. По построенной карте можно выявить нарушения ландшафтной структуры, связанные с разработкой месторождения. Например, в местах добычи в результате изъятия нефти и подземных растворов происходит проседание поверхности, приводящее к заболачиванию местности, и на месте исходных торфяников образуются низинные болота. На построенной карте хорошо прослеживаются участки заболоченности вдоль протяженных внутри-промысловых нефтепроводов месторождения (топяные участки). Вычисленная

Приводится описание структуры программного обеспечения системы автоматизированной интерпретации АКИ, получившей название «LandMapper» (рис.4). Программные средства системы «LandMapper» представляют совокупность взаимосвязанных подсистем и программных модулей, объединенных в рамках растровой (РК) и векторной (ВК) компонент системы. Оригинальной частью системы «LandMapper» в составе РК являются подсистемы визуализации

средствами пространственного анализа ВК суммарная площадь топяных участков в близости от промышленных объектов составила 305 Га, что свидетельствует о неблагоприятном антропогенном воздействии.

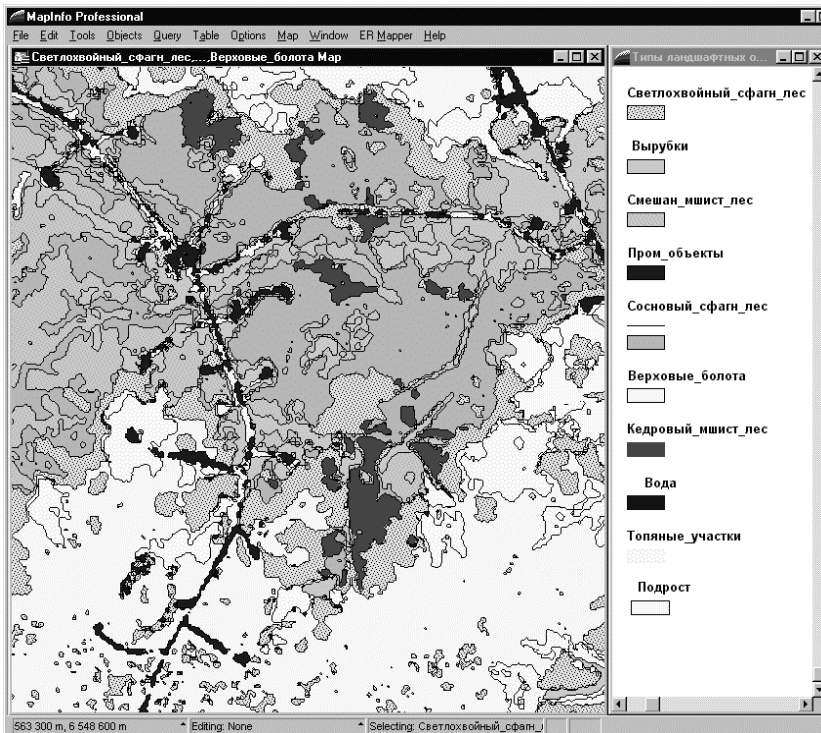


Рис.6. Фрагмент векторной ландшафтно-экологической карты

вом как качественного, так и количественного математико-статистического изучения ландшафтных структур Первомайского месторождения. Проведение периодической актуализации построенной ландшафтно-экологической карты средствами системы «LandMapper» с использованием постоянно обновляемой аэрокосмической информации позволит с помощью ВК системы отслеживать динамику изменения площади ландшафтов и расширение заболоченных зон, контролировать объемы вырубок леса и т.д., обеспечивая информационную поддержку для принятия управленческих решений по разработке мероприятий экологического оздоровления среды месторождения.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

В приложение вынесен акт о внедрении полученных результатов.

Основные результаты работы

В ходе выполнения диссертационной работы были получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Рассмотрены особенности задач ландшафтного тематического картирования с использованием аэрокосмических изображений. Сформулирована и проанализирована проблема автоматизированной интерпретации (дешифрирования) аэрокосмических изображений с использованием методов распознавания образов при решении этих задач. Показана перспективность разработки подходов к интерпретации изображений с использованием принципов непараметрической статистики и текстурного анализа.

Другим примером количественной оценки нарушения ландшафтной структуры является расчет площадей участков механического уничтожения лесной растительности в результате вырубок в районе Первомайского месторождения. Так суммарная площадь вырубок вдоль промышленных коммуникаций составила около 950 Га, что также показывает довольно высокий уровень негативного воздействия на ландшафтную структуру территории месторождения.

Созданная карта является эффективным средством

2. Предложена концепция автоматизированной интерпретации аэрокосмических изображений, включающая основные принципы распознавания ландшафтных объектов и концептуальную схему процесса интерпретации аэрокосмических изображений. На основе предложенной концепции сформулированы основные требования к разрабатываемой системе автоматизированной интерпретации аэрокосмических изображений и принципы ее построения.

3. Предложен двухэтапный метод классификации изображений с расширенной системой признаков, учитывающей спектральные и пространственные свойства ландшафтных объектов. Для решения задачи анализа информативности и оптимизации расширенной системы признаков обосновано применение метода выбора значимых признаков, использующего принцип усеченного перебора и оценку критерия информативности Джеффри-Мацушита. На основе предложенного метода классификации изображений разработан реализующий его итерационный алгоритм.

4. Разработан алгоритм классификации аэрокосмических изображений, использующий непараметрическую оценку условных плотностей распределения признаков в распознаваемых классах и независящий от вида оцениваемых плотностей. Особенностью алгоритма является его высокая вычислительная эффективность по сравнению с традиционными непараметрическими алгоритмами.

5. На основе предложенных алгоритмов классификации разработана итеративная адаптивная процедура распознавания ландшафтных объектов на аэрокосмических изображениях. Процедура использует расширенную систему признаков и адаптивное решающее правило, позволяющее при распознавании объектов на изображении выбирать наиболее эффективный алгоритм классификации по эмпирическим критериям точности и вычислительной сложности.

6. Проведено исследование эффективности алгоритмов классификации, положенных в основу адаптивной процедуры распознавания, с использованием оригинальных модельных данных и реальных космических изображений. По результатам исследования сделан вывод об эффективности данных алгоритмов и адаптивной процедуры распознавания в целом.

7. Разработана структура и созданы программные средства системы интерпретации аэрокосмических изображений «LandMapper». Программные средства системы функционируют на компьютерах типа IBM PC под управлением операционной системы Windows 98/NT. Объем исходного кода системы составляет более 15000 строк на языках C++ и MapBasic.

8. Проведена апробация разработанной системы «LandMapper» на примере решения задачи ландшафтно-экологического картирования территории Первомайского нефтяного месторождения по космическому снимку РЕСУРС-О1 (камера МСУ-Э). Приведены некоторые результаты оценки численных характеристик ландшафтных объектов.

9. Осуществлено внедрение результатов решения задачи ландшафтно-экологического картирования, а также алгоритмического и программного обеспечения системы «LandMapper» в ОАО «ТомскНИПИнефть ВНК» — дочернем предприятии ЗАО ИЦ «Юкос», о чем получен соответствующий акт.

Основные публикации по теме диссертации

1. Markov N.G., Napryushkin A.A. Aerospace photography data processing while entering it into vector geoinformation system // Abstracts of the 3-rd Korean-Russian International Symposium on Science and Technology, NSTU, 1999, p.284
2. Марков Н.Г., Напрышкин А.А., Ковин Р.В., Захарова А.А. ГИС-технология для ландшафтно-экологических исследований // Материалы международной конференции "ГИС для оптимизации природопользования в целях устойчивого развития территорий (Интеркарто-5)", Якутск: ЯГУ, 1999, с.36-45
3. Markov N.G., Napryushkin A.A., Kovin R.V., Zaharova A.A. Vector-raster GIS for detection and assessment of urban pollution zones with use of aerospace monitoring data // Proceedings of 4-th EC conference - Historical Cities Sustainable Development: "The GIS as Design and Management Support" - HISTOCITY 2000, Italy, European Committee, 2000, pp.156-162
4. Markov N.G., Napryushkin A.A. Automatized extracting of geometric information from aerospace images // Abstracts of International Symposium GEO-MARK 2000, Paris, France, European Space Agency, 2000, p.52
5. Markov N.G., Napryushkin A.A. Use of remote sensing data at thematic mapping in GIS // Proceedings of the 3rd AGILE Conference on Geographic Information Science, Helsinki/Espoo, Finland, AGILE, 2000, pp.51-55
6. Markov N.G., Napryushkin A.A., Badmaev D.G. The neuronet approach for mapping forest types using aerospace imageries // Proceedings of the 3-rd International Workshop on Computer Science and Information Technologies CSIT-2001, Ufa, USATU Publishers, 2001, pp.107-111
7. Markov N.G., Napryushkin A.A. Application of aerospace methods for monitoring urban areas // Proceedings of the International Workshop «Historical centers and territories: Theories, Methods and Applications», Italy, University of Cagliari, 2001, pp. 58-63
8. Markov N.G., Napryushkin A.A., Badmaev D.G. The neuronet technology for aerospace monitoring data interpretation // Proceedings of the 5-th Korean-Russian International Symposium on Science and Technology, Tomsk, TPU, 2001, pp. 88-92
9. Markov N.G., Napryushkin A.A. Self-organizing GIS for solving problems of ecology and landscape studying // Proceedings of the 4-th AGILE conference on Geographic science, Brno, Czech republic, Masaryk University, 2001, pp. 462-467
10. Markov N.G., Napryushkin A.A., Zamyatin A.V. Application of neural network methods in RS-based thematic mapping // Abstracts of the 5-th AGILE conference on Geographic science, Palma de Mallorca, Spain, 2002, pp.485-490
11. Markov N.G., Napryushkin A.A. Adaptive system for extracting information about spatial objects from aerospace imageries // Abstracts of Russian-American Seminar «Studies of Socio-Natural Co-Evolution from Different Parts of the World», Novosibirsk, 2002, <http://iwep.ab.ru/~workshop/>
12. Markov N.G., Napryushkin A.A., Zamyatin A.V., Vertinskaya E.V. Adaptive procedure for RS images classification with extended feature space // Proceedings of the 9-th International Symposium on Remote Sensing "Remote Sensing 2002", Greece, 2002, vol.5, pp.170-182