На правах рукописи

Владимир Семенович Марчуков

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ СЕГМЕНТАЦИИ

25.00.34 – АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена на кафедре космического мониторинга
Московского Государственного Университета геодезии и картографии (МИИГАиК).

Научный консультант: доктор технических наук,
профессор Малинников В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Арженко Н.И.

доктор технических наук,
профессор Галкин Ю.С.

доктор технических наук,
профессор Цветков В.Я.

Ведущая организация: ФГУП Госцентр "Природа"

Защита диссертации состоится «____» «_ _____» 20 г. в «____» час. на заседании диссертационного совета 212.143.01 Московского Государственного Университета геодезии и картографии (МИИГАиК), по адресу: 105064, Москва, К-64, Гороховский переулок, 4 (зал заседаний Ученого Совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИИГАиК.

Автореферат разослан «_____» «_____» 20 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Краснопевцев Б.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации систематизированы и обобщены результаты теоретических и экспериментальных исследований автора в области разработки и внедрения методов тематической обработки аэрокосмических изображений, полученные соискателем в период с 1989 по 2011 годы.

В результате указанных работ решена научная проблема, имеющая важное значение для устойчивого экологического и социально-экономического развития территорий, – создана теория и методология тематической обработки аэрокосмических изображений земной поверхности на основе многоуровневых алгоритмов сегментации.

Актуальность темы.

Одной из приоритетных задач решения проблемы контроля природной среды и антропогенных объектов является наличие достоверной и многоплановой информации о состоянии природных экосистем и их динамике. Подобные сведения могут быть положены в основу выбора дальнейшей стратегии поведения человека, как в региональном, так и в глобальном плане. Получение такой информации представляет собой сложную научно-техническую задачу. Для её решения необходимо создание информационно-управляющих систем, важным компонентом которых являются аэрокосмические средства, а также развитие новых методов и технологий обработки изображений земной поверхности, поступающих от систем дистанционного мониторинга.

При тематической обработке данных аэрокосмической съёмки информационные классы определяются, как набор объектов, которые необходимо выделить согласно требованиям решаемой тематической задачи и которые разделяются в имеющемся множестве данных.

Изображения, полученные в результате дистанционного зондирования, характеризуются следующими свойствами: они содержат разнообразные однородные области, причём внутриклассовые среднеквадратичные отклонения характеристик часто сравнимы с разбросом между классами. Такие изображения называют сложными. При анализе сложного изображения все известные методы цифровой классификации не могут гарантировать получения требуемого результата.

Основной проблемой при тематической обработке сложных изображений земной поверхности является то, что применение алгоритмов классификации, использующих определённые условия однородности классов объектов и определённое пространство классификационных признаков, зачастую приводит к выделению на изображении сегментов, не соответствующих информационным классам решаемой тематической задачи. Для преодоления возникающих трудностей необходимо применять многоуровневые

алгоритмы классификации, использующие различные условия однородности классов объектов и различные подмножества классификационных признаков, учитывающие структурно-пространственные характеристики изображения. Все это обусловливает необходимость разработки теории и методов тематической обработки аэрокосмических изображений на основе многоуровневых алгоритмов сегментации.

Актуальность темы настоящей работы определяется следующими факторами:

- нерешенностью проблем информационного обеспечения задач контроля природных экосистем;
- недостаточным развитием и использованием аэрокосмических методов и технологий для контроля природной среды и антропогенных объектов;
- необходимостью разработки новых подходов к проведению комплексного мониторинга природной среды и антропогенных объектов на основе результатов обработки и анализа информации, получаемой от различных датчиков и систем наблюдения.

Актуальность данной работы подтверждается использованием её результатов в проектах, выполняемых в рамках Федеральной Целевой Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2012 годы».

Целью настоящих исследований являлось решение актуальной научной проблемы тематической обработки аэрокосмических изображений земной поверхности на основе многоуровневых алгоритмов сегментации.

Пути решения этой проблемы были определены следующим образом:

- разработка теории и методологии многоуровневой тематической обработки аэрокосмических изображений земной поверхности;
- проведение экспериментальных исследований эффективности разработанных многоуровневых методов тематической обработки при решении различных тематических задач контроля природной среды и экологического мониторинга;
- исследование возможностей повышения эффективности тематической сегментации за счёт использования технологии параллельной обработки изображений.

Научная новизна работы. В результате выполнения работы впервые разработаны теория и практическая методология многоуровневой тематической обработки аэрокосмических изображений земной поверхности. Впервые разработаны теоретические схемы построения структурно - пространственной моделей исследуемых изображений и тематической классификации изображений с использованием структурно - пространственной модели. Созданы новые алгоритмы выделения структурно-пространственных элементов на изображении. Получены новые математические выра-

жения для количественной оценки эффективности распараллеливания и расчёта оптимальной конфигурации вычислительного кластера при обработке изображений.

На защиту выносятся следующие новые научные результаты:

- теория и методология тематической обработки на основе многоуровневой сегментации изображений, с использованием их структурно - пространственной модели;
- методология создания структурно-пространственной модели исследуемых изображений;
- алгоритмы выделения точечных и малоразмерных объектов посредством локальной пороговой обработки с адаптивным выбором пороговых значений на основе оценки локального контраста;
- метод автоматизированного формирования временных серий тематических карт растительного покрова и грунтов по данным дистанционного мониторинга;
- методы автоматического определения пространственного распределения изменений растительного покрова и грунтов по данным дистанционного мониторинга;
- метод многоуровневой тематической обработки радиолокационных изображений сверхвысокого разрешения;
- метод количественной оценки эффективности распараллеливания и расчёта оптимальной конфигурации вычислительного кластера при обработке изображений алгоритмами, использующими поэлементное сканирование изображений, и скользящими пространственными фильтрами.

Область применения: разработанные методы могут широко использоваться:

- в автоматизированных системах контроля и прогноза состояния и динамики природной среды и антропогенных объектов ;
- в лесном и сельском хозяйстве;
- при мониторинге и оценке последствий чрезвычайных ситуаций;
- учебном процессе и других областях.

Значимость работы определяется возможностью исследования текущего состояния и динамики природных экосистем и антропогенных объектов с использованием новых методов и алгоритмов обработки информации в целях дальнейшего устойчивого развития экономики Российской Федерации.

Практическая ценность работы. Теория и методы, изложенные в данной работе, используются в ряде российских организаций, работающих в области дистанционного зондирования.

Разработки автора использованы в комплексном проекте по теме «Технологии оценки состояния и динамики растительных ресурсов наземных экосистем на основе

дистанционного мониторинга», выполняемом в рамках Федеральной Целевой Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2012 годы».

Исследования автора вошли в курсы лекций «Тематическое дешифрирование снимков», «Технология тематической обработки данных дистанционного зондирования», «Дешифрирование аэрокосмических снимков», «Космический мониторинг», «Автоматизированные системы сбора и обработки результатов дистанционного зондирования».

Разработки автора вошли в «Методические указания по ведению топографического мониторинга территории города Москвы по материалам космической съёмки для решения задач мониторинга фактического использования земель», утвержденные Первым заместителем Мэра Москвы в Правительстве Москвы 28 сентября 2004г., введенные в действие – Приказом Департамента земельных ресурсов города Москвы 2 ноября 2004г. №82; Приказом Комитета по архитектуре и градостроительству города Москвы 1 ноября 2004г. №167.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности. Полученные результаты диссертационной работы соответствуют пункту 4 «Теория и технология дешифрирования изображений с целью исследования природных ресурсов и картографирования объектов исследования» и пункту 5 «Теория и технология получения количественных характеристик динамики природных и техногенных процессов с целью их прогноза» паспорта специальности 25.00.34 «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия», в рамках которой предлагается к защите данная работа.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены на 12 Международных и Всероссийских научно-технических конференциях и семинарах.

Публикации. По проблематике диссертации опубликованы 33 научные работы в том числе 19 работ в журналах рекомендованных ВАК, 2 учебных пособия, рекомендованных УМО высших учебных заведений Российской Федерации по образованию в области геодезии и фотограмметрии для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Фотограмметрия и дистанционное зондирование».

Структура и объём диссертационной работы. Работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 234 страницах, содержит 106 рисунков и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные научные и практические результаты.

Глава 1. Дистанционное зондирование Земли и проблемы тематической интерпретации аэрокосмических изображений.

В первой главе рассмотрены основные подходы и проблемы автоматизированной тематической обработки аэрокосмических снимков (АКС) для решения задач контроля природной среды. Проведён анализ возможностей использования современных аэрокосмических систем дистанционного зондирования земной поверхности. Рассмотрены и проанализированы методы предварительной и тематической обработки АКС земной поверхности. Проанализированы функциональные возможности ряда программных пакетов обработки изображений.

Тематическая обработка цифровых многозональных аэрокосмических изображений математически может быть определена следующим образом. Исходные многозональные цифровые изображения представляются дискретной векторной функцией $\boldsymbol{F}(x,y)$, определённой на двумерном дискретном пространстве (x,y).

Процесс тематической обработки определяется оператором следующего вида.

$$\boldsymbol{F}(x,y) \Rightarrow s(x,y), \qquad (1)$$

где

$s(x,y)$ - дискретная скалярная функция;

$s(x,y)= p_j$, если (x,y) принадлежит классу j;

p_j - цифровые метки соответствующих классов;

$j = 1,2,...,K,K+1;$

K - количество выявляемых классов объектов, определяемое требованиями определённой тематической задачи.

Класс $j=K+1$ представляет собой смесь всех классов объектов, представленных на изображении, определение которых не является необходимым для решаемой тематической задачи, и трактуется как “фон”.

На основе проведённого анализа средств дистанционного зондирования земной поверхности аэрокосмического базирования можно утверждать, что данные многозональной съёмки позволяют решать широкий круг тематических задач контроля природной среды. При использовании в качестве алгоритмов получения классифицированного изображения пороговой обработки, гиперпараллелепипедного метода и кластерного анализа в процессе классификации не учитываются структурно-пространственная информация, содержащаяся на изображении. Методы наращивания однородных областей и методы, основанные на выделении границ, учитывают структурно-пространственные связи между соседними пикселами. К их недостаткам следует отнести более низкий уровень автоматизации и необходимость организации отдельного этапа, обеспечиваю-

щего идентификацию выделенных однородных областей, как определённых объектов на местности. Существующие программные пакеты обработки и анализа изображений содержат большое количество процедур, позволяющих формировать разнообразные модифицированные признаки, и основные алгоритмы классификации путём разметки точек изображения.

Проблема тематической обработки сложных изображений земной поверхности заключается в том, что для эффективного выделения тематических объектов с различной пространственной конфигурацией необходимо использование разных предикатов однородности. С целью повышения эффективности целесообразно применение многоуровневых алгоритмов классификации с учётом структурно-пространственных характеристик изображения и различных предикатов однородности.

Глава II. Теория и методология построения многоуровневых алгоритмов автоматизированной обработки аэрокосмических изображений земной поверхности.

Во второй главе описана теория многоуровневой обработки с использованием структурно-пространственной модели. Дано описание методологии создания структурно-пространственной модели исследуемых изображений. Приведено обоснование набора алгоритмов для выделения элементов пространственной структуры. Разработана методология тематической обработки изображений с использованием структурно - пространственной модели.

Теоретическая схема многоуровневой обработки с использованием структурно-пространственной модели.

Предлагаемый теоретический подход основан на разделении процесса тематической обработки аэрокосмических изображений земной поверхности на два этапа. На первом этапе осуществляется построение структурно-пространственной модели исследуемых изображений. На втором этапе применяется многоуровневая классификация, использующая различные алгоритмы классификаторов, которые работают не с неупорядоченным набором данных, а с данными определённой пространственной структуры. Полученная на первом этапе структурно-пространственная модель изображений используется на втором этапе для выбора различных алгоритмов модификации исходных изображений, выбора подмножества цифровых признаков для классификации определённого элемента пространственной структуры и управления работой классификатора.

На рис. 1 показана разработанная теоретическая схема многоуровневой классификации, с использованием структурно-пространственной информации об объектах, представленных на изображении.

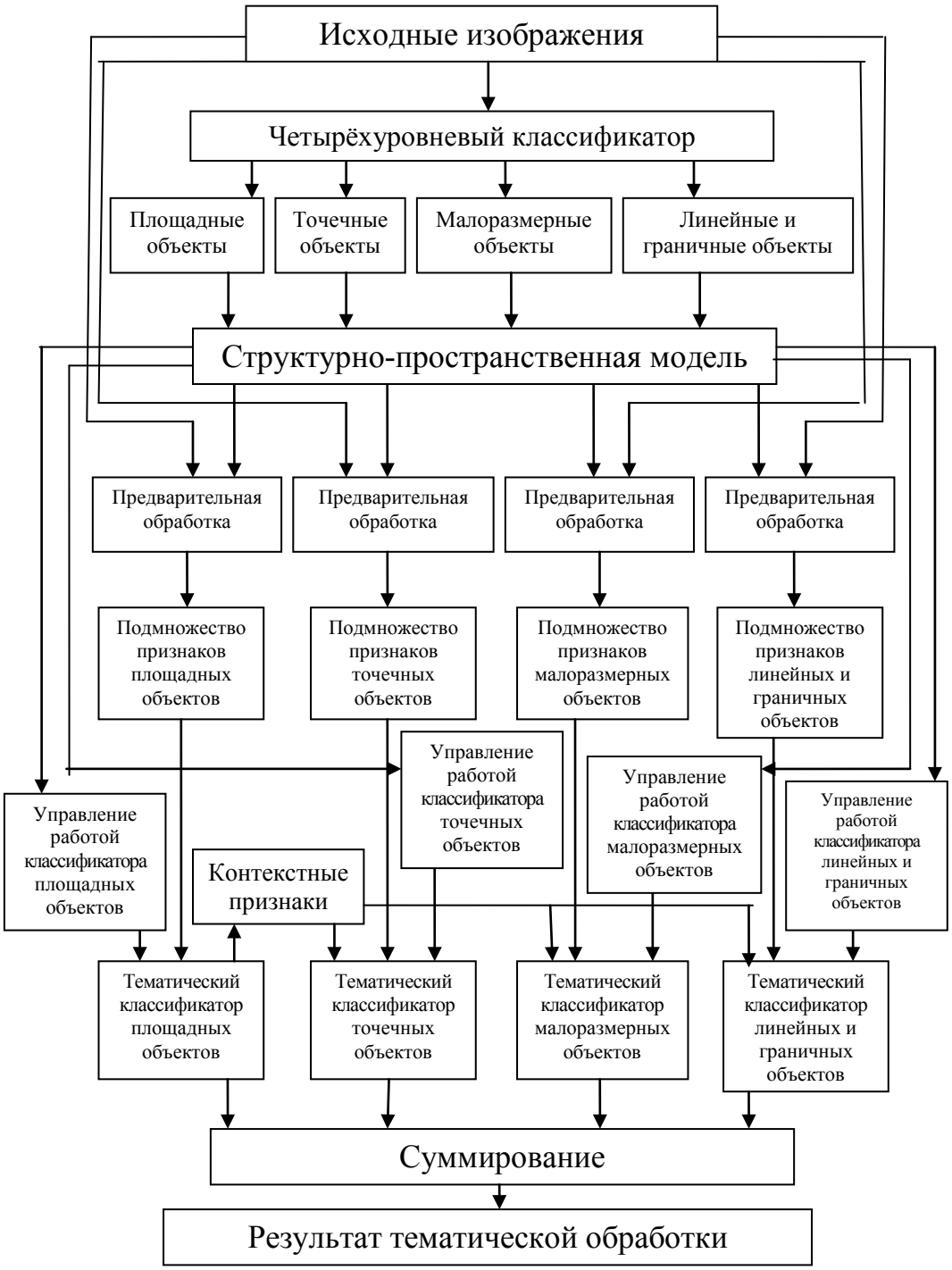

Рис.1. Теоретическая схема многоуровневой классификации изображений с использованием структурно - пространственной модели

Анализ пространственной структуры сложных аэрокосмических изображений показал, что на них целесообразно выделить четыре типа структурно-пространственных элементов, отличающихся по своим статистическим и пространственным характеристикам, и требующим соответственно различных подходов при выборе алгоритма классификатора и набора цифровых признаков для их классификации:

- граничные и линейные объекты, характеризуемые высоким значением градиента в каком-либо направлении и низким в ортогональном ему направлении, хотя бы в од-

ной зоне спектрального диапазона;

- точечные объекты, занимающие на изображении не более одного пикселя, со значением интенсивности, существенно отличающимся от значений интенсивности прилегающей окрестности, хотя бы в одной зоне спектрального диапазона;

- протяжённые (площадные) объекты – однородные сегменты на изображении, линейные размеры которых более 10 пикселей в любом направлении;

- малоразмерные объекты, представляющие собой пятна, не отвечающие условиям отнесения к точечным, граничным и линейным объектам, с линейными размерами менее 10 пикселей в любом направлении.

В предлагаемой теоретической схеме в результате первого этапа классификации создаётся структурно-пространственная модель исследуемых изображений, представляющая собой классифицированное четырехуровневое изображение, на котором выделены четыре класса, соответствующие вышеопределённым элементам пространственной структуры.

Процесс построения многоуровневых алгоритмов классификации содержит следующие шаги:

1. Выделение элементов пространственной структуры площадных объектов, точечных объектов, малоразмерных объектов, граничных и линейных объектов. Этот шаг выполняется путём использования четырёхуровневого классификатора.
2. Построение структурно-пространственной модели исследуемых изображений.
3. Предварительная обработка исходных изображений и выбор оптимального подмножества признаков для тематической классификации выделенных элементов пространственной структуры.
4. Тематическая классификация элементов пространственной структуры.
5. Формирование итогового классифицированного изображения.

Методология создания структурно-пространственной модели исследуемых изображений.

Построение структурно-пространственной модели необходимо осуществлять применяя многоуровневый классификатор, так как выделение классов структурных элементов в силу различия их геометрических и контекстных свойств требуют, соответственно, различных подходов при их классификации.

Для решения задачи выделения на поле исходных изображений структурного элемента “точечные объекты” может использоваться “разностный алгоритм». Последовательное применение данного алгоритма ко всем совместно обрабатываемым изображениям и последующее сложение полученных бинарных изображений позволяет выде-

лить все точки, имеющие локальный контраст хотя бы в одной зоне спектрального диапазона. Недостатком данного алгоритма является необходимость эмпирического подбора пороговых значений при получении бинарных изображений в интерактивном режиме. Отмеченный недостаток устранен в разработанном автором алгоритме выделения точечных объектов посредством локальной пороговой обработки с адаптивным выбором пороговых значений на основе оценки локального контраста обрабатываемой точки изображения (x,y). Алгоритм работает следующим образом.

Обрабатываемое изображение сканируется скользящим окном размером 3x3 элемента изображения, в котором определяются выборочные оценки среднего значения интенсивности μ и среднего квадратичного отклонения σ (СКО) по следующим формулам

$$\mu = \frac{1}{8}[\sum_{i=-1}^{1}\sum_{j=-1}^{1} f(x+i, y+j) - f(x,y)]$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{8}\{\sum_{i=-1}^{1}\sum_{j=-1}^{1}[f(x+i, y+j) - \mu]^2 - [f(x,y) - \mu]^2\} \quad (2)$$

Полученные оценки используются для определения локальных пороговых значений $T(x,y)$ при выделении точечных объектов по следующему правилу. Элемент изображения определяется, как точечный объект, если выполняется следующее условие

$$abs(f(x,y) - \mu) < T(x,y) \quad (3)$$

где $T(x,y) = k\sigma$ k - некоторая константа.

Для теоретического обоснования выбора значения константы k примем предположение о Гауссовом распределении значений интенсивности фона, на котором расположен точечный объект. Вероятность ложного обнаружения точечного объекта F будет определяться следующим выражением.

$$F(k) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{k} \exp(-t^2/2)dt \quad (4)$$

откуда определяется значение k.

Использование данного алгоритма позволяет автоматически выделять точечные объекты с заданной вероятностью ложного обнаружения F.

Для выделения малоразмерных объектов также может быть использован «разностный алгоритм». Недостатком этого алгоритма является то, что он наряду с малоразмерными объектами выделяет контрастные линейные объекты определённой толщины. Для устранения этого недостатка был разработан модифицированный алгоритм выделения малоразмерных объектов, работающий следующим образом.

Исходное изображение сканируется окном размером 3*l*x3*l* элементов, где *l* равняется линейной толщине выделяемых малоразмерных объектов. В этом окне выбираются 9 окон размером *l*x*l* элементов, в которых вычисляются средние значения интенсивности μ и средние квадратичные отклонения σ. Малоразмерный объект выделяется в том случае, если среднее значение в центральном окне μ_0 существенно отличается от средних значений в каждом из прилегающих восьми окон $\mu_1,...,\mu_8$.

Полученные выборочные средние значения и СКО используем для построения обнаружителя малоразмерных объектов с заданными вероятностными характеристиками. Определим вероятность правильного обнаружения малоразмерного объекта $P_{по}$, как вероятность принятия решения об обнаружении малоразмерного объекта в случае наличия малоразмерного объекта, и вероятность ложного обнаружения малоразмерного объекта $P_{ло}$, как вероятность принятия решения об обнаружении малоразмерного объекта в случае отсутствия малоразмерного объекта.

Рассмотрим случай, когда значения интенсивности малоразмерного объекта превышают значения интенсивности фона. В предположении о Гауссовом характере распределения значений интенсивности малоразмерных объектов вероятность правильного обнаружения будет определяться следующим выражением

$$P_{по}(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{k_{по}}^{\infty} \exp(-t^2/2)dt \qquad (5)$$

где $k_{по}$ - некоторая константа правильного обнаружения, определяемая из выражения (5).

Приняв предположение о Гауссовом характере распределения значений интенсивности фона, получим следующую формулу, определяющую вероятность ложного обнаружения

$$P_{ло}(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{k_{ло}}^{\infty} \exp(-t^2/2)dt \qquad (6)$$

где $k_{ло}$ – некоторая константа ложного обнаружения, определяемая из выражения (6).

Соответствующие вышеопределённым константам значения интенсивностей $f_{по}$ и $f_{ло}$ определяются из следующих выражений

$$k_{по} = \frac{(\mu_o - f_{по})}{\sigma_o} \qquad k_{ло} = \frac{(f_{ло} - \mu_ф)}{\sigma_ф} \qquad (7)$$

где μ_o - выборочное среднее интенсивности малоразмерного объекта

σ_o - СКО интенсивности малоразмерного объекта;

$\mu_ф$ - выборочное среднее интенсивности фона;

$\sigma_ф$ - СКО интенсивности фона.

$f_{по} = \mu_о - k_{по}\sigma_о$ $f_{ло} = \mu_ф + k_{ло}\sigma_ф$

Решение об обнаружении малоразмерных объектов принимается при выполнении условия $f_{по} \geq f_{ло}$ и, соответственно, решающее правило обнаружения малоразмерных объектов большей интенсивности, чем фон имеет следующий вид

$$\frac{\mu_о - \mu_ф}{k_{по}\sigma_о + k_{ло}\sigma_ф} \geq 1 \qquad (8)$$

Повторив вышеприведённые выкладки для случая, когда интенсивность малоразмерных объектов меньше интенсивности фона получим следующее решающее правило

$$\frac{\mu_ф - \mu_о}{k_{по}\sigma_о + k_{ло}\sigma_ф} \geq 1 \qquad (9)$$

Соответственно решающее правило обнаружения малоразмерных объектов в общем случае будет иметь следующий вид

$$\frac{abs(\mu_ф - \mu_о)}{k_{по}\sigma_о + k_{ло}\sigma_ф} \geq 1 \qquad (10)$$

Решение об обнаружении малоразмерного объекта принимается при выполнении условия (10) для всех сочетаний центрального окна ($\mu_о$ $\sigma_о$) с восемью соседними окнами (μ_i σ_i) i= 1,...,8. Последовательное применение этого алгоритма ко всем обрабатываемым зональным изображениям и последующее сложение изображений с выделенными малоразмерными объектами позволяет получить изображение малоразмерных объектов, которые удовлетворяют вышеопределённому критерию, хотя бы в одном спектральном диапазоне.

На основе экспериментальных исследований работы разностного и адаптивного порогового алгоритма сделаны следующие выводы. И разностный алгоритм, и предложенный адаптивный пороговый алгоритм обеспечивают уверенное выделение малоразмерных объектов со значением контраста выше 1. Уменьшение контраста при использовании обоих алгоритмов приводит к снижению вероятности правильного обнаружения, причём оба алгоритма перестают выделять малоразмерные объекты с уровнем контраста ниже 0,4. Использование разностного алгоритма приводит к ложному выделению малоразмерных объектов на контрастных границах однородных областей, а также в местах расположения линейных объектов. Адаптивный пороговый алгоритм, обеспечивая правильное обнаружение малоразмерных объектов, позволяет исключить ложное выделение линейных объектов и границ однородных областей, как малоразмерных объектов.

Выделение элементов пространственной структуры изображений, определённых как “протяжённые объекты” и “граничные и линейные объекты”, осуществляется путём

классификации изображений, на которых выделены “точечные”, и “малоразмерные” объекты, соответственно, обработке подвергаются точки изображения, не отнесённые к этим элементам. Выделение элемента структуры “граничные и линейные объекты” осуществляется путём пороговой обработки изображений с контрастированными границами. Для получения изображений с контрастированными границами обычно используются два вида алгоритмов:

- алгоритмы пространственного дифференцирования;
- алгоритмы высокочастотной Фурье-фильтрации.

Для выбора пороговых значений можно использовать эталонные участки границ, осуществляя подбор пороговых значений в интерактивном режиме. Общая блок-схема построения структурно-пространственной модели, обрабатываемых изображений, показана на рис. 2.

Рис. 2. Блок-схема построения структурно-пространственной модели изображений.

В результате получаем классифицированное четырёхуровневое изображение, описывающее структурно-пространственные характеристики исследуемых изображений.

Методология тематической классификации изображений с использованием структурно - пространственной модели.

Полученная на первом этапе обработки структурно-пространственная модель исследуемых изображений позволяет организовать процесс тематической сегментации на

основе многоуровневой классификации.

На первом уровне второго этапа классифицируются протяжённые объекты. Теоретическое обоснование их тематической классификации на первом уровне основывается на том, что они определяются максимальным числом признаков и, вследствие этого, возможностью их эффективной классификации на первом уровне без использования контекстной информации. В тоже время результаты их сегментации могут быть использованы на последующих уровнях для формирования модифицированных контекстных признаков. Для выделения классов протяжённых объектов в зависимости от их свойств, статистических и геометрических характеристик могут использоваться различные классификаторы, как на основе выделения границ однородных областей, так и на основе разметки точек изображения.

Для осуществления теоретически обоснованного выбора вида классификатора определим следующие типы протяжённых объектов:

1. протяжённые объекты с относительно постоянным значением интенсивности по полю снимка, хотя бы в одной зоне спектрального диапазона;
2. протяжённые объекты с градиентом интенсивности во всех зонах спектрального диапазона и с высоким значением градиента интенсивности на границах хотя бы в одной зоне спектрального диапазона;
3. протяжённые объекты с градиентом интенсивности и невысоким значением градиента на границах во всех зонах спектрального диапазона.

На основе проведённого анализа преимуществ и недостатков различных видов классификаторов можно сделать вывод о наибольшей целесообразности использования методов максимального правдоподобия и гиперпараллелепипеда для классификации протяжённых объектов 1-го типа. В случае классификации протяжённых объектов типа 2 используется классификатор на основе методов выделения границ однородных областей. Для сегментации объектов типа 3 наиболее эффективным является применение методов наращивания однородных областей.

В общем случае при тематической обработке изображений, содержащих протяжённые объекты всех трёх типов, необходимо использовать подуровни классификации с различными видами классификаторов – метода максимального правдоподобия или гиперпараллелепипеда для объектов типа 1, выделения границ однородных областей для типа 2 и метода наращивания однородных областей для типа 3.

На следующем уровне осуществляется тематическая классификация малоразмерных объектов. Для их выделения обоснованным является применение того же подхода и видов классификаторов, что и при сегментации протяжённых объектов 1-го типа. Ис-

пользование более высокого уровня повышает эффективность их выделения, так как в соответствующее подмножество классификационных признаков могут быть добавлены модифицированные контекстные признаки, полученные путём обработки результатов тематической обработки протяжённых объектов на первом уровне.

На третьем уровне тематической классификации выделяются граничные и линейные объекты. Как отмечалось выше, они характеризуются большим разбросом спектральных интенсивностей, поэтому для их правильной идентификации необходимо использование контекстной информации, полученной в результате предыдущих уровней тематической сегментации. На четвёртом уровне классифицируются точечные объекты. Как было отмечено выше, большой разброс значений их спектральных интенсивностей и их геометрические размеры делают невозможным использование при их классификации спектральных и текстурных признаков, вследствие чего на первый план выходит использование контекстной информации. Вместе с тем алгоритмы классификации, использующие только контекстные признаки, позволяют разделить точечные объекты на весьма ограниченное число классов, определяемое числом фоновых (по отношению к точечным объектам) классов, выделенных на предыдущих уровнях, и обеспечивают невысокую достоверность классификации. С целью увеличения количества классов, на которые разделяются точечные объекты, и повышения достоверности предлагается использовать спектрально-контекстные признаки точечных объектов, определяемые следующим образом.

Каждый класс точечных объектов определяется значениями спектральных контрастов по отношению к спектральным интенсивностям класса, на фоне которого находится данный точечный объект. В каждой зоне спектрального диапазона спектрально-контекстный признак точечного объекта может принимать три значения:

- +1 - в случае положительного контраста в этой зоне;
- -1 - в случае отрицательного контраста;
- 0 - если контраст в данной зоне отсутствует.

Использование практических методик тематической обработки на основе структурно-пространственной модели открывает следующие возможности повышения вероятности правильного распознавания тематических объектов:

- выбор разных видов классификаторов, оптимальных для тематической классификации определённого структурного элемента;
- выбор оптимального подмножества классификационных признаков для каждого структурного элемента;
- использование более сложных и эффективных алгоритмов классификации.

Глава 3. Многоуровневая тематическая обработка многозональных аэрокосмических изображений.

В третьей главе представлены методики тематической обработки многозональных аэрокосмических изображений. Приведены результаты исследований выявления заболоченных территорий по данным многозональной съёмки КА Landsat-7 участка территории в Истринском районе Московской области. Описаны особенности отображения различных видов земных покрытий в разных спектральных диапазонах. Представлена методика тематической обработки данных многозональной съёмки КА Landsat-7 участка территории в районе г. Дубна Московской области и снимков в 9 спектральных диапазонах, полученных с датчика Aster КА Terra, участка территории Московской области в районе Приокско-террасного государственного биосферного заповедника. Проведён анализ полученных результатов. Приведены результаты экспериментального исследования нового алгоритма автоматизированного выделения малоразмерных объектов заданного размера, позволяющего достоверно выделять объекты с сохранением разрешающей способности исходных снимков. Описан метод создания почвенных карт на основе концепции ландшафтно-индикационного многоуровневого дешифрирования территорий.

Методика тематической обработки многозональных изображений КА Landsat-7.

Исследовалась территория в районе г. Дубна Московской области. На рис. 3-8 представлены зональные снимки этой территории, полученные с КА Landsat-7 в диапазонах 0,45-0,52 мкм, 0,52-0,60 мкм, 0,63-0,69 мкм, 0,76-0,90 мкм, 1,55-1,75 мкм, 2,08-2,35 мкм, соответственно.

Для проведения тематической обработки была построена методика, использующая структурно-пространственную модель исследуемых изображений и многоуровневую классификацию. Результат тематической обработки с использованием автоматизированных и визу альных методов показан на рис. 9. Блок-схема методики представлена на рис. 10.

Рис. 3

Рис. 4

Рис. 5

Рис. 6

Рис. 7

Рис. 8

Рис. 9. Результат многоуровневой тематической обработки.

Для получения количественных оценок достоверности по результатам тематической обработки была рассчитана вероятность правильной классификации объектов. В качестве критерия использовалась вероятность правильной классификации класса К, определённая следующим образом.

По контрольному участку (участкам) класса К определяются его площадь в пикселях S_k и количество пикселей N_k, отнесённых по результатам классификации к классу К. По контрольном участкам всех остальных классов находится класс Q с максимальным значением количества пикселей N_q, отнесённых по результатам классификации к классу К. Определяется площадь контрольного участка класса в пикселях S_q и количество пикселей N_q, по результатам классификации к классу К. Вероятность правильной классификации класса К - P_k рассчитывается по формуле

$$P_k = \frac{1}{2}\left[\frac{N_k}{S_k} + \frac{(S_q - N_q)}{S_q}\right] \qquad (11)$$

Сравнительная экспериментальная оценка вероятности правильной классификации с использованием многоуровневой классификации и по методике одноуровневой контролируемой классификации приведена в таблице 1. Из данных таблицы 1 видно, что для отдельных классов объектов применение многоуровневой классификации обеспечивает повышение вероятности правильной классификации на 12 %.

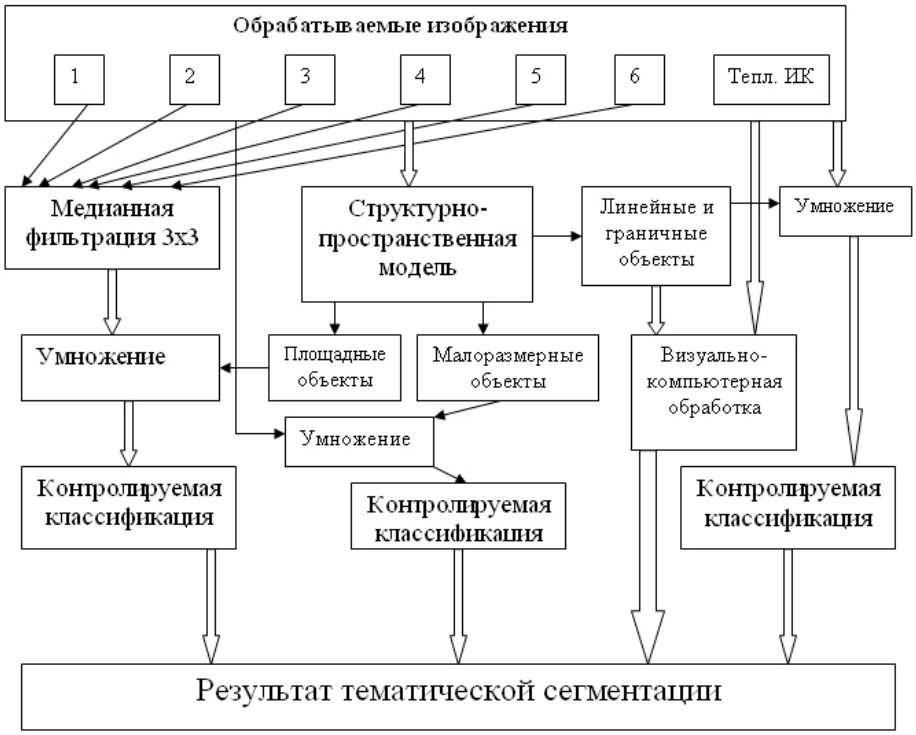

Рис. 10. Блок-схема методики многоуровневой тематической обработки.

Табл. 1. Вероятности правильной классификации. Погрешности, рассчитанные по методу Корнфельда

Объекты	Вероятность / Погрешность			
	Многоуровневая сегментация		Одноуровневая сегментация	
Глубоководные объекты	0,94	0,1	0,94	0,1
Мелководные объекты	0,91	0,1	0,89	0,1
Луга	0,87	0,3	0,75	0,4
Хвойные леса	0,92	0,1	0,91	0,1
Смешанные леса	0,89	0,1	0,88	0,1
Лиственные леса	0,87	0,1	0,86	0,1
Садово-огородные участки	0,88	0,2	0,79	0,3
Кварталы городского типа	0,9	0,3	0,77	0,3

Методика выявления заболоченных территорий по данным многозональной съёмки КА Landsat-7.

На рис. 11-15 представлены зональные снимки КА Landsat 7 в диапазонах 0,45-0,52 мкм., 0,52-0,60 мкм., 0,63-0,69 мкм, 0,76-0,90 мкм., 1,55-1,75 мкм. На снимках отображен участок территории Московской области на границе Истринского и Рузского районов. Исследовалась возможность определения заболоченных участков территории путём автоматизированной многоуровневой классификации. Результат представлен на рис. 16. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что использование данных многозональной съёмки в 5 зонах спектрального диапазона (3 видимых, 1 ближний ИК и 1 средний ИК) обеспечивает возможность получения достоверной картины расположения заболоченных участков в лесной местности.

Рис. 11.

Рис. 12.

Рис. 13.

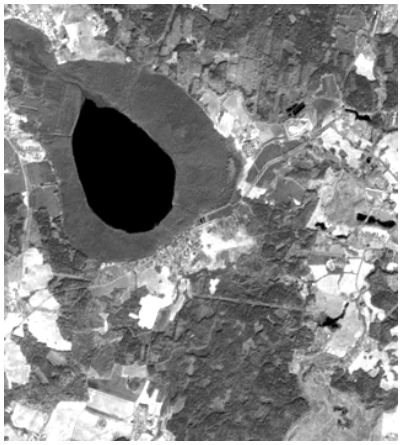

Рис. 14

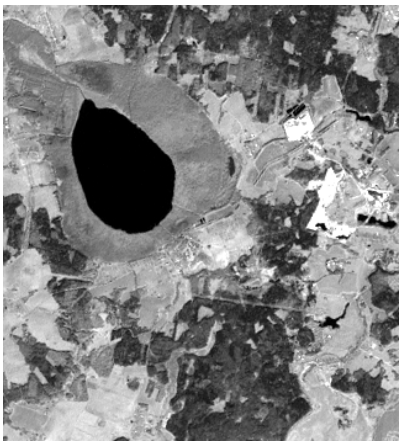

Рис. 15.

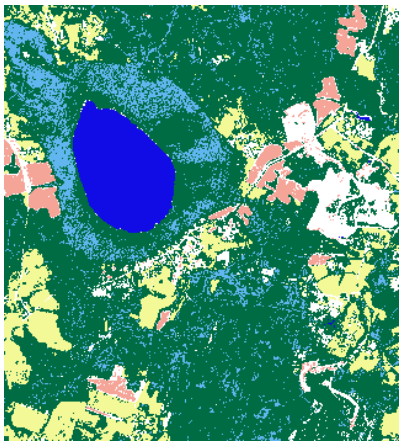

Рис. 16.

Условные обозначения

Гидрография	
Заболоченные участки	
Лесная растительность	
Луга	
Населенные пункты	
Пустыри	

Экспериментальная проверка по тестовым участкам заболоченных территорий и лесной растительности показала, что вероятность правильной классификации заболоченных участков составляет 82%. При решении данной задачи по методике одноуровневой контролируемой классификации была получена вероятность правильной классификации заболоченных участков 79%.

Методика тематической обработки снимков с датчика Aster КА Terra.

Исходными данными для тематической обработки являлись зональные изображения участка территории Московской области. Исследуемая территория интересна тем, что на ней представлен набор различных компонентов ландшафта - антропогенных и природных, характерных, как для лесных, так и для степных территорий. Для решения задачи выделения природно-хозяйственных объектов была применена методология многоуровневой сегментации. Автоматизированная сегментация не позволяет выделить линейные объекты, ширина которых не превышает одного пиксела, такие как автомобильные дороги, ЛЭП, небольшие речки. Их определение проводилось визуально в интерактивном режиме. Общая блок-схема описанного процесса многоуровневой сегментации показана на рис. 17.

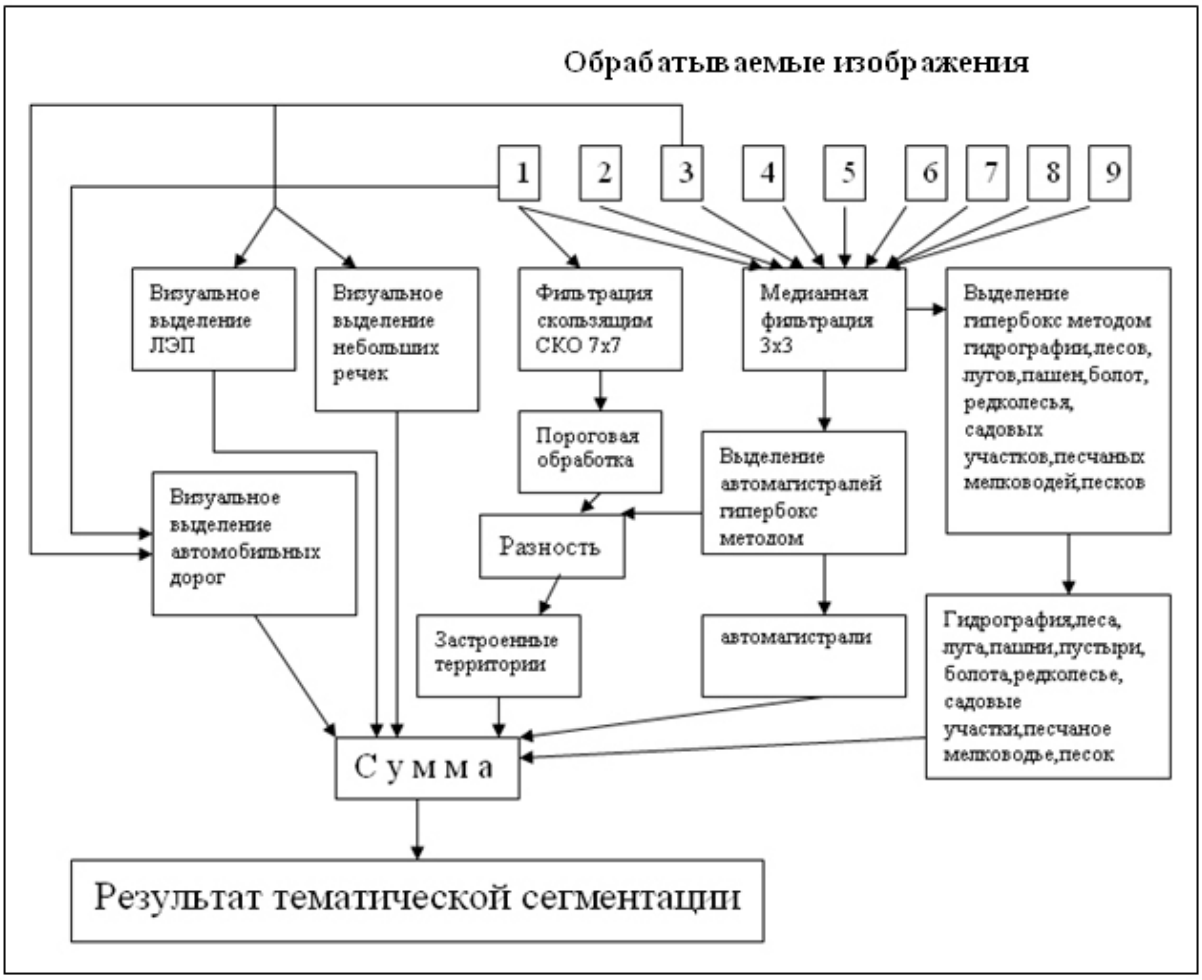

Рис. 17. Общая блок-схема процесса многоуровневой сегментации.

Сравнительная оценка вероятности правильной классификации природно-хозяйственных объектов по формуле (11) для многоуровневой сегментации и одноуровневой методологии контролируемой сегментации приведена в табл. 2. Сравнительный анализ результатов, полученных с помощью использования методик многоуровневой сегментации многозональных изображений, основанный не только на примерах, приведенных в данной работе, но и на широком ряде изображений различных территорий, показал устойчивое повышение вероятности правильного распознавания до 15%.

Табл. 2. Вероятности правильной классификации. Погрешности по методу Корнфельда

Объекты	Вероятность ПК / Доверительный интервал			
	Многоуровневая классификация		Одноуровневая классификация	
площадные объекты гидрографии	0.94	0,1	0.94	0,1
автомагистрали	0.91	0,1	0.89	0,2
застроенные территории	0.95	0,3	0.8	0,3
лесная растительность	0.96	0,2	0.91	0,2
заболоченные участки	0.87	0,2	0.81	0,2
луга	0.94	0,3	0.82	0,4
пашни	0.93	0,3	0.8	0,3
пустыри	0.91	0,2	0.81	0,3
молодая поросль леса	0.95	0,1	0.91	0,2

садово-огородные участки	0.94	0,2	0.85	0,2
песчаные поверхности	0.92	0,2	0.86	0,2
песчаное мелководье	0.88	0,1	0.87	0,1

Обработка многозональных космических снимков для целей почвенного картографирования.

Изучение и картографирование почвенного покрова – главная задача географии почв. Основным источником информации о состоянии почвенного покрова являются полевые исследования и наблюдения и их последующий лабораторный анализ. Наряду с широким использованием контактных методов исследований в почвоведении все большее значение приобретают дистанционные методы изучения почв. Наиболее эффективным является совместное использование контактных и дистанционных методов изучения почв. При изучении почв по данным дистанционного зондирования (ДДЗ) ключевую роль играют ландшафтные индикаторы, прежде всего растительный покров и рельеф.

Исследование эффективности многоуровневой тематической обработки многозональных изображений для создания почвенных карт было выполнено на примере участка территории в западной части Минской области Республики Беларусь.

Исходными материалами для выполнения работы являлись данные дистанционного зондирования (многозональные снимки спутника Landsat 7 ETM+) и результаты полевых обследований. Разработанная методика основана на концепции ландшафтно-индикационного дешифрирования. В районе исследований почва не является «физиономичным» объектом, поэтому, для ее распознавания требуется использовать ландшафтные индикаторы, главными из которых являются растительность и рельеф.

Многоуровневое дешифрирование изображения осуществлялось в пределах определённых пространственных масок, соответствующих неким ландшафтным единицам. В качестве масок, соответствующих ландшафтным единицам, выбраны следующие: водные объекты, пойма реки, заболоченные земли, земли сельскохозяйственного назначения (луга, пастбища, пахотные земли), леса, мелиорированные земли. Создание масок производилось в интерактивном и автоматическом режиме. В автоматическом режиме были выделены классы водных объектов и лесов, создание масок поймы реки, заболоченных земель и земель сельскохозяйственного назначения производилось в ручном режиме. Для дешифрирования почв использовались изображения в пределах масок поймы, заболоченных земель и сельскохозяйственных земель. Блок-схема описанного процесса многоуровневого дешифрирования почв показана на рис. 18. На рис. 19. приведен результат тематической обработки.

На основе анализа полученных результатов можно утверждать, что при условии

детального полевого обследования эталонных участков типичных классов почв многоуровневое дешифрирование с использованием масок, относящихся к различным ландшафтным единицам, позволяет получать достаточно достоверные почвенные карты по данным многозональной съёмки.

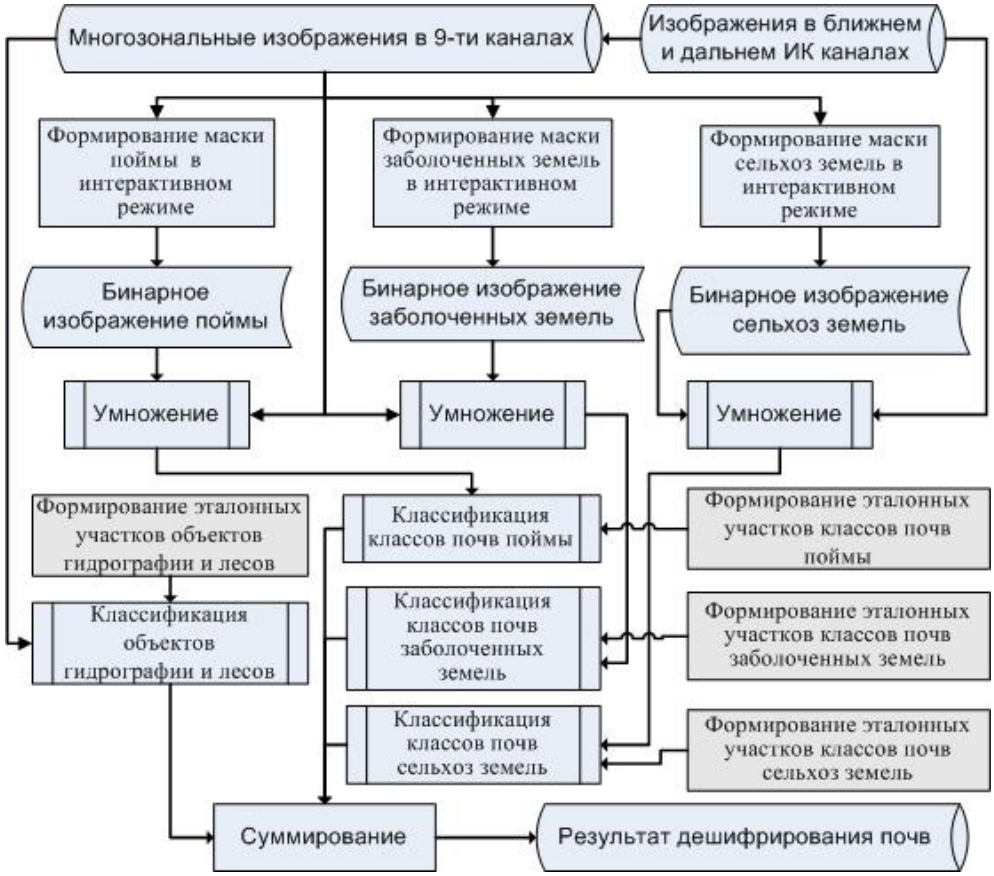

Рис. 18. Блок-схема процесса многоуровневого дешифрирования почв.

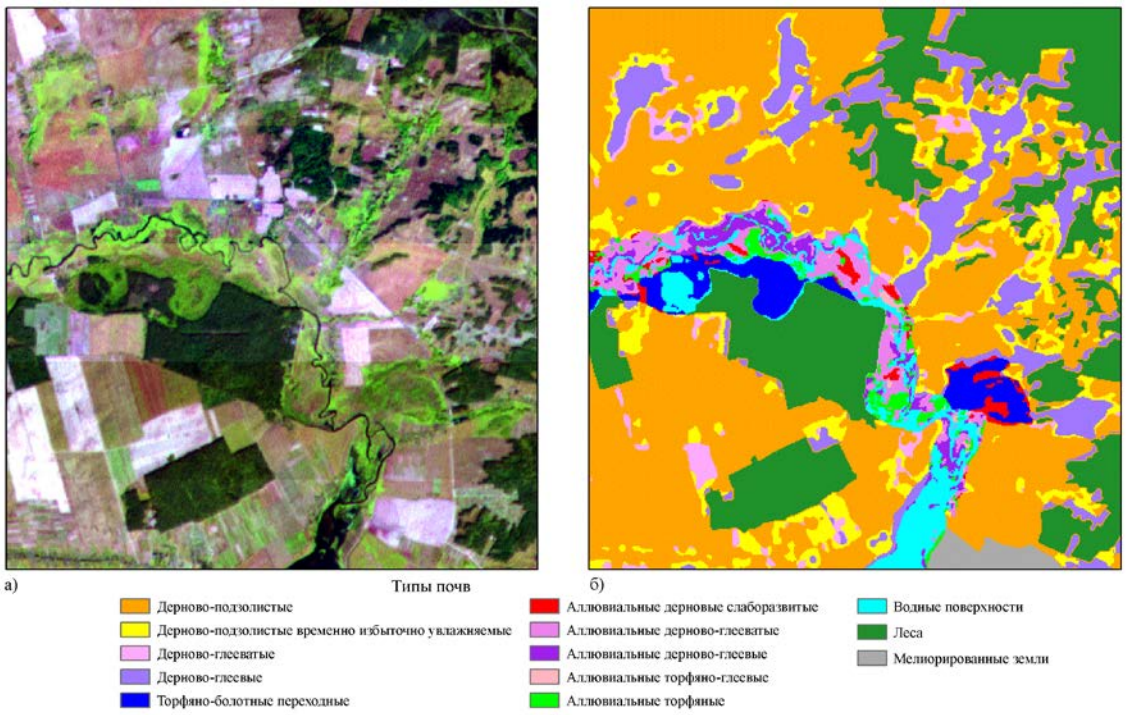

Рис. 19. а) RGB представление исходных данных; б) результат дешифрирования почв.

Глава 4. Автоматизированная технология оценки динамики растительного покрова и других типов наземных экосистем по временным сериям данных дистанционных наблюдений.

В четвёртой главе представлены разработанные основы технологии оценки динамики растительного покрова и других типов наземных экосистем описана архитектура и общие принципы функционирования.

Описаны разработанные методы автоматизированного формирования временных серий тематических карт растительных покровов и грунтов по данным дистанционного мониторинга, автоматического определения замещений объектов, автоматического определения изменений границ экосистем.

Приведены результаты экспериментального исследования работы разработанных методов на примерах участков территории Московской и Вологодской областей.

Базовые основы технологии оценки динамики растительного покрова и других типов наземных экосистем по данным дистанционного зондирования.

Технология оценки динамики по данным ДЗЗ состоит из следующих этапов:

- сбор и первичная обработка исходной информации;
- тематическая обработка данных ДЗЗ;
- формирование качественных и количественных характеристик объектов;
- формирование качественных и количественных характеристик состояния и динамики объектов. Генерализация тематических карт. Генерализация качественных и количественных характеристик объектов;
- хранение исходных данных, результатов их обработки и обеспечение регламентированного доступа к ним;
- обеспечения интерактивного доступа пользователей к спутниковым и картографическим базам данных непосредственно в окне web-браузера, с предоставлением возможностей пространственного анализа.

Общая блок-схема технологии оценки динамики показана на рис. 20.

Метод автоматизированного формирования временных серий тематических карт растительного покрова и грунтов по данным дистанционного мониторинга.

Широко распространенным и эффективным путём выявления тенденций динамики структуры растительного покрова и грунтов является сопоставление разновременных тематических карт одного и того же участка местности. В разработанном методе автоматизированного формирования временных серий тематических карт растительных покровов и грунтов по данным дистанционного мониторинга для повышения достоверности результатов автоматизированного дешифрирования применяется многоуровневая

тематическая классификация. Общая блок-схема дешифрирования элемента временного ряда с использованием многоуровневой классификации показана на рис. 21.

Рис. 20. Блок-схема технологии оценки динамики наземных экосистем по данным ДЗЗ.

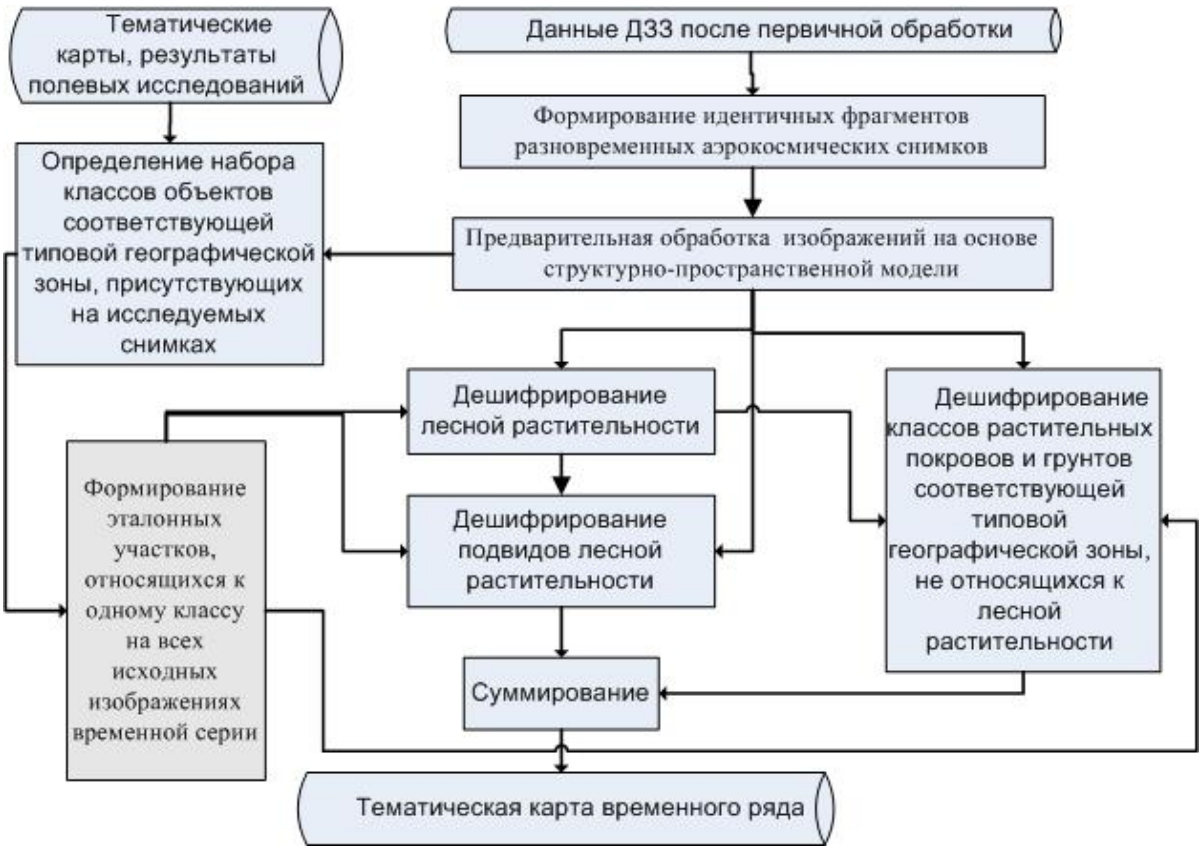

Рис. 21. Общая блок-схема дешифрирования изображений временного ряда.

На первом этапе осуществляется выбор и формирование геометрически идентичных фрагментов разновременных аэрокосмических снимков. Исходные разновременные аэрокосмические снимки могут иметь разный масштаб и быть представлены в различных проекциях. Поэтому на первом этапе осуществляется геометрическая коррекция исходных аэрокосмических снимков временного ряда с целью их представления в определённой единой проекции, системе координат и масштабе.

На втором этапе осуществляется определение набора подлежащих дешифрированию классов объектов растительного покрова и грунтов, присутствующих на изображении. После определения набора классов объектов на втором этапе производится формирование эталонных участков для каждого класса, относящихся к одному классу на всех исходных изображениях временной серии.

В рамках решаемой задачи необходимо выявлять объекты, которые относятся к типу протяжённых (площадных). Поэтому на третьем этапе дешифрирования осуществляется преобразование исходных изображений с целью устранения ошибок классификации, возникающих вследствие присутствия на изображении точечных, малоразмерных, граничных и линейных объектов. Блок-схема предварительной обработки исходных изображений на основе структурно-пространственной модели показана на рис. 22.

Итогом обработки третьего этапа является набор зональных изображений, в которых значения спектральных интенсивностей пикселей точечных, малоразмерных, линейных и граничных объектов замещены медианой значений спектральных интенсивностей протяжённых объектов в некоторой локальной окрестности.

На четвёртом этапе выделяются участки лесной растительности. Блок-схема алгоритма выделения лесной растительности показана на рис. 23.

На пятом этапе тематической сегментации производится выделение видов лесной растительности, присутствующих на исследуемой территории. Блок-схема алгоритма выделения видов лесной растительности показана на рис. 24.

На шестом этапе тематической сегментации производится выделение растительных покровов и грунтов соответствующей территориально-географической зоны, не отнесённых к лесной растительности. Блок-схема алгоритма выделения объектов растительных покровов и грунтов, не отнесённых к лесной растительности, показана на рис. 25.

На седьмом этапе формируется конечный продукт тематической обработки путём сложения бинарных и многоуровневых изображений, полученных в результате выполнения пятого и шестого этапов.

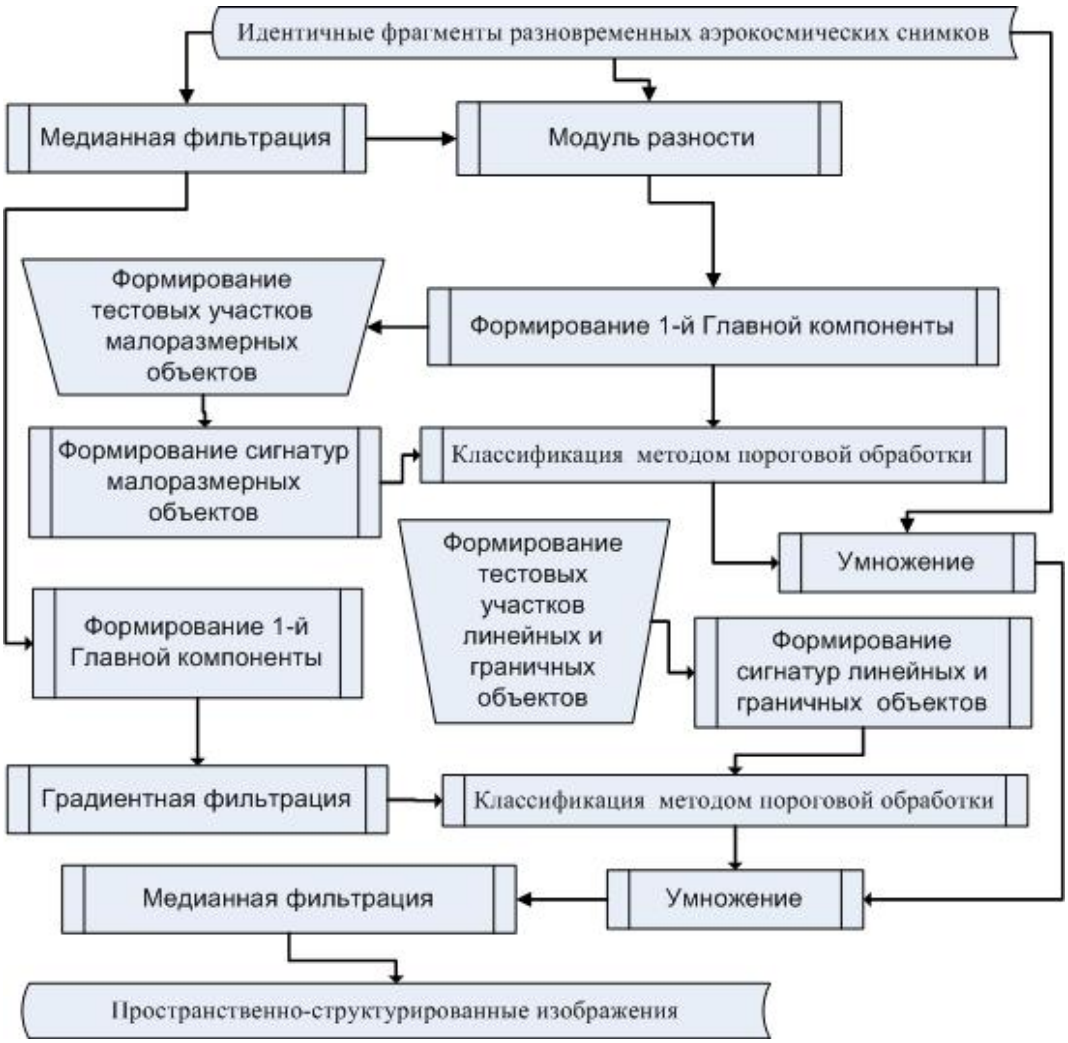

Рис. 22. Блок-схема предварительной обработки исходных изображений на основе структурно - пространственной модели.

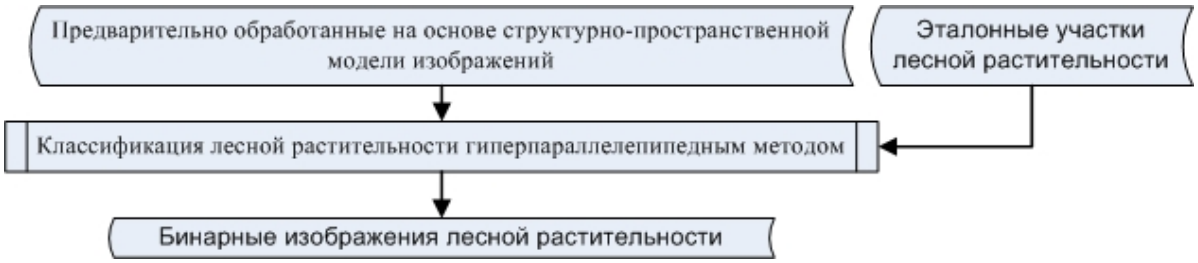

Рис. 23. Блок-схема алгоритма выделения лесной растительности.

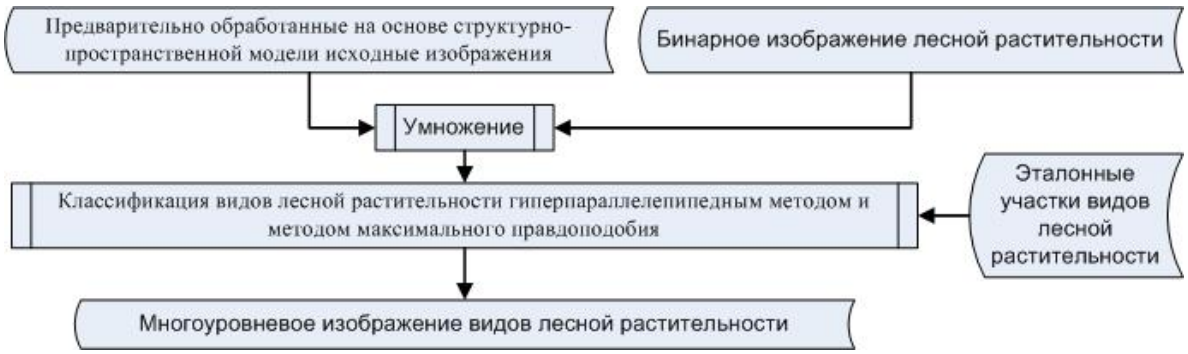

Рис. 24. Блок-схема алгоритма выделения видов лесной растительности.

Рис. 25. Блок-схема алгоритма выделения объектов растительных покровов и грунтов, не отнесённых к лесной растительности.

Методы автоматического определения пространственного распределения изменений растительного покрова и грунтов по данным дистанционного мониторинга.

В настоящее время активно развиваются приёмы отражения динамики явлений и процессов на одной карте. Карты динамики заменяют серии разновременных карт, показывают состояние явления в разные моменты времени. Широкие возможности получения качественных и количественных оценок открывает представление результатов сравнения разновременных аэрокосмических материалов на картах:

- отображающих пространственное распределение участков замещений объектов за определённый период;

- совмещающих контуры объектов на разные даты.

Для решения этих задач были разработаны методы интерпретации временных рядов аэрокосмических снимков, обеспечивающие выявление изменившихся и вновь появившихся объектов. Исходными данными являются взаимосогласованные результаты тематического дешифрирования аэрокосмических изображений одного и того же участка территории на две разные даты. Взаимосогласованность исходных тематических изображений предполагает их пространственную (геометрическую) совмещённость, идентичный набор представленных классов объектов, полученных по единой методике дешифрирования и обозначенных одинаковыми цифровыми кодами.

Блок-схема алгоритма разработанного метода автоматического определения замещений объектов показана на рис. 26.

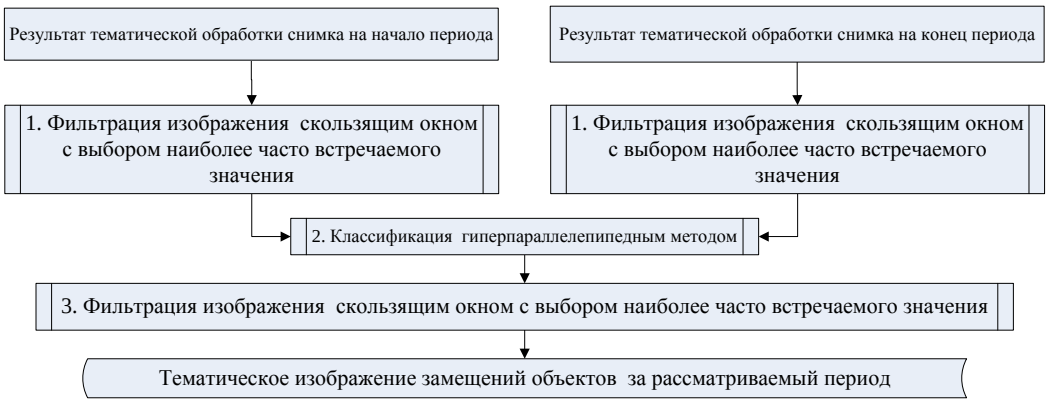

Рис. 26. Блок-схема алгоритма автоматического определения замещений объектов.

Блок-схема алгоритма автоматического выявления определения изменений границ растительного и почвенного покрова показана на рис. 27.

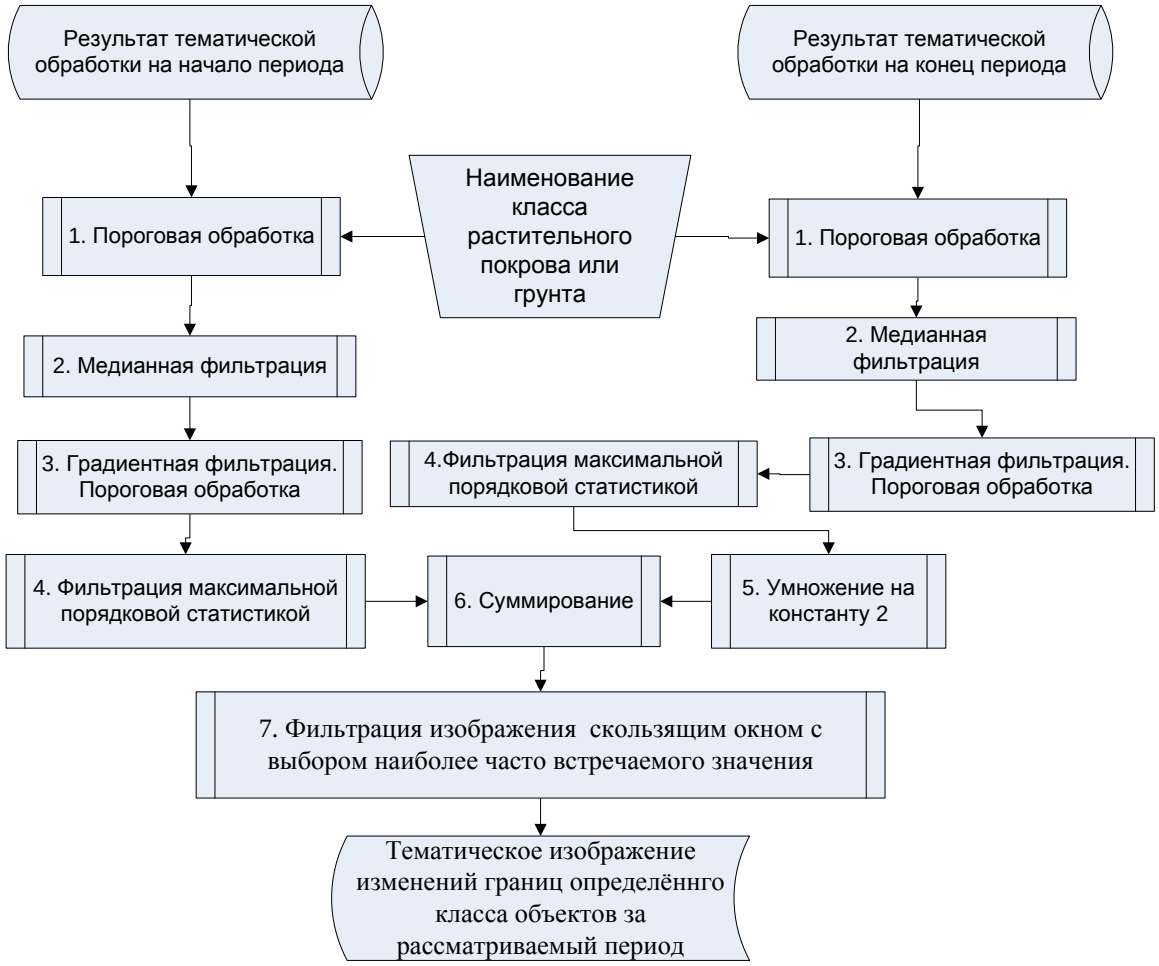

Рис. 27. Блок-схема алгоритма автоматического определения изменений границ экосистем.

Глава 5. Тематическая обработка радиолокационных и тепловых изображений земной поверхности.

Пятая глава посвящена вопросам тематической обработки радиолокационных снимков и изображений земной поверхности, полученных в тепловом ИК диапазоне. Показано, что автоматизированная тематическая сегментация радиолокационных изображений сопряжена со значительными трудностями, вследствие чего далеко не все объекты видимые на снимке могут быть выделены в автоматизированном режиме. Представлена методика тематической обработки радиолокационных изображений, сочетающая на разных этапах визуальные и автоматизированные методы.

Описана разработанная технология автоматизированного определения состояния теплотрасс по данным тепловизионной аэросъёмки.

Автоматизированная тематическая обработка радиолокационных снимков.

На рис. 28 представлен радиолокационный снимок, полученный радиолокатором с синтезированной апертурой, участка территории Раменского района Московской обла-

сти в районе деревни Фенино. Разрешающая способность на местности 3м. Значительная часть исследуемой территории занята лесом, лугами и сельскохозяйственными полями. На снимке также представлены следующие объекты: озеро, автомобильные дороги, агропромышленный объект, деревня и дачные участки. На рис. 29 представлены гистограммы распределений отмеченных классов объектов. Анализ гистограмм тестовых участков объектов, присутствующих на радиолокационном снимке, позволяет сделать следующие выводы. Значения яркости лесной растительности расположены практически во всем динамическом диапазоне и пересекаются со значениями яркости всех других классов объектов, представленных на снимке. Выделение лесной растительности по значениям яркости невозможно.

Рис. 28. Исходное радиолокационное изображение.

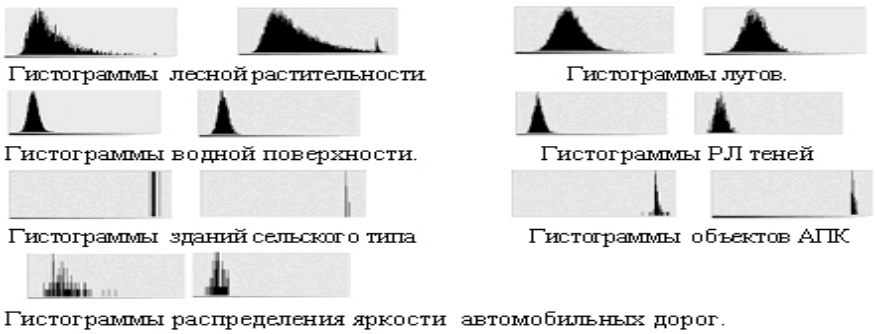

Рис. 29. Гистограммы распределения яркостей объектов.

Значения яркости лугов незначительно пересекаются со значениями яркости водных объектов и радиолокационных теней и практически не пересекаются со значениями яркости объектов агропромышленного комплекса, зданий сельского типа и построек дачных участков и эти объекты могут быть разделены по яркостным признакам. Яркости водной поверхности и радиолокационных теней практически не отличаются друг от друга и отображаются радиолокационном снимке чёрным тоном, который существенно отличается от всех других объектов, представленных на снимке. Таким образом, водные поверхности и радиолокационные тени могут быть эффективно отделены от всех объектов, кроме лесной растительности, по яркостному признаку. Гистограммы яркости объектов агропромышленного комплекса, зданий сельского типа и построек дачных участков имеют одинаковый вид и характеризуются высокими значениями яркости, по которым они могут быть отделены от всех объектов, кроме лесной растительности. Гистограммы яркости автомобильных дорог полностью пересекаются с гистограммами лесов и лугов.

Разработанная многоуровневая методика содержит следующие этапы.

На первом этапе выделяются по яркостному признаку на исходном изображении объекты гидрографии и радиолокационные тени.

На втором этапе путём использования алгоритмов выделения объектов определенного размера определяются здания агропромышленного комплекса и здания сельского типа.

На третьем этапе визуально в интерактивном режиме осуществляется выделение автомобильных дорог.

На четвёртом этапе определяются луга и лесная растительность. Этот этап выполняется после первых трёх этапов, так как использует полученные результаты. Для выделения лесной растительности и лугов использовалось исходное изображение, из которого были удалены участки, занятые сооружениями агропромышленного комплекса, зданиями сельского типа, автомобильными дорогами, объектами гидрографии и радиолокационными тенями, полученные в результате сегментации на первых трёх этапах. Путём обработки исходного изображения получаются два модифицированных изображения – изображение, обработанное медианным фильтром 9x9 элементов и изображение, представляющее собой разность максимальных и минимальных значений в скользящем окне размером 11x11 элементов, которое характеризует текстурные особенности лесной растительности и лугов. Выделение лесной растительности и лугов производится путём контролируемой классификации трёх вышеперечисленных изображений по методу максимального правдоподобия. Результат обработки показан на рис. 30.

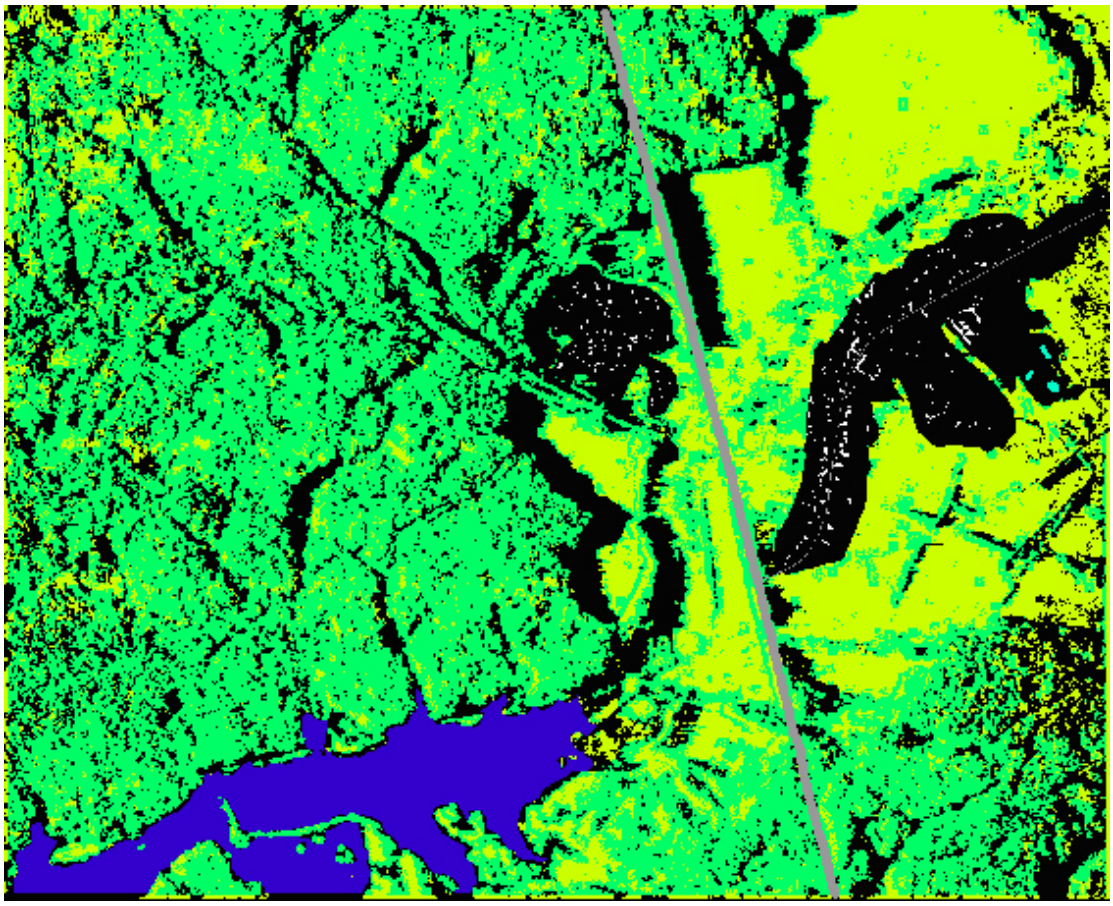

Рис. 30. Результат тематической сегментации.

Результаты исследований показали возможность создания эффективных методик автоматизированной тематической обработки РЛ снимков на основе многоуровневой классификации.

Использование данных тепловизионной аэросъёмки для мониторинга состояния теплотрасс.

Подтопление участков теплотрасс при авариях на городском водопроводе существенно изменяют картину теплового излучения. Визуальная тематическая обработка материалов тепловизионной аэросъёмки занимает значительный период времени. По этой причине очевидна целесообразность применения автоматизированных методов интерпретации.

На рис. 31 представлено тепловое изображение участка территории города Москвы в районе Вешняковской улицы, полученное в марте 2003 года с помощью тепловизионного комплекса "Икар-002" (разработка ГНПП "Аэрогеофизика"). На изображении присутствуют следующие объекты: проезжие части Реутовской улицы, аллеи Жемчуговой и Вешняковской улицы, жилые здания, гаражи, древесная и кустарниковая растительность, автомобили, участки и камеры тепловых сетей. На изображении присутствуют тепловые сети. На снимке можно видеть участки теплотрасс с различными значениями

яркости, что немаловажно при анализе экспериментальных данных.

Визуальный анализ значений яркости на снимке показывает, что участки тепловых сетей выделяются более высокими значениями интенсивности, причём эти значения для аварийных участков превышают значения яркости для других участков теплотрасс. Вместе с тем такими же высокими значениями яркости на снимке отображаются некоторые здания и их части.

Рис. 31. Изображение в тепловом диапазоне, разрешающая способность 0,5м.

Разработанная технологическая схема локальной классификации аварийных участков теплотрасс по материалам тепловизионной съёмки в качестве исходных данных использует тепловизионное изображение исследуемого участка территории и эксплутационную схему теплотрасс на данную территорию. На первом этапе на основе данных эксплуатационной схемы формируется бинарное растровое изображение (схема) местоположения теплотрасс для исследуемого участка территории.

На втором этапе осуществляется геометрическая привязка тепловизионного изображения к растровому изображению теплосетей путём трансформирования первого в проекцию второго.

На третьем этапе с целью расширения участков теплотрасс производится фильтрация скользящими порядковыми статистиками бинарного растрового изображения местоположения теплотрасс. Этот шаг выполняется для того, чтобы устранить влияние неточности данных эксплуатационной схемы и погрешностей съёмки.

На следующем четвёртом этапе из исходного изображения, геометрически привязанного к схеме тепловых сетей, полученного в результате второго этапа, вычитается бинарное (чёрный тон 0, белый тон 255) изображение схемы ТС после фильтрации скользящими порядковыми статистиками, полученное в результате выполнения треть-

его этапа.

На последнем пятом этапе проводится пороговая обработка разностного изображения.

Анализ результата автоматизированной обработки по вышеприведённой технологической схеме показал, что она позволяет при наличии электронных схем расположения теплосетей на конкретный участок территории с высокой вероятностью правильного обнаружения (выше 90%) выделять участки тепловых сетей с высоким значением теплопотерь.

Глава 6. Обработка изображений на высокопроизводительных вычислительных системах параллельной архитектуры.

В шестой главе рассмотрены вопросы повышения производительности обработки изображений за счёт использования параллельных вычислений. Приведен анализ существующих вариантов программного обеспечения и аппаратной реализации многопроцессорных систем. Изложена разработанная методология определения оптимальных параметров вычислительного кластера и оценки эффективности распараллеливания алгоритмов обработки изображений.

Одним из путей повышения эффективности цифровой обработки изображений является использование многопроцессорных вычислительных систем. Локальные сети, специально собранные для использования в качестве многопроцессорной системы, компактно размещенные в одном или нескольких шкафах, оснащенные программным обеспечением, ориентированным исключительно на управление установкой как единым целым, называются кластерами выделенных рабочих станций.

Существует три возможности распараллеливания вычислений: первая – распараллеливание по структурам данных; вторая – распараллеливание по алгоритмам преобразований; третья заключается в использовании различных комбинаций первых двух.

Алгоритмическое распараллеливание представляет собой задачу, решение которой полностью зависит от вида конкретного алгоритма. В тоже время отличительной особенностью задач обработки изображений является наличие "естественного" параллелизма по данным. Распараллеливание по данным предполагает разбиение входных данных на порции, например - разбиение изображения на несколько областей, обработка которых ведется независимо и одновременно, с применением одного и того же алгоритма. В общем случае разбиение входных данных предполагает сбор и интеграцию результатов обработки отдельных порций. Распараллеливание, связанное с декомпозицией данных, опирается на структуры данных, встречающиеся в обработке изображений. Ряд алгоритмов решения задач классификации изображений не требуют одновре-

менного обращения ко всем элементам изображения и используют построчное (постолбцовое) сканирование, при этом в каждый момент времени обрабатывается один элемент изображения. К ним относятся такие широко используемые алгоритмы:

- классификация по минимуму расстояния;
- классификация гиперпараллелепипедным методом;
- классификация по принципу максимального правдоподобия.

При решении задач предварительной обработки наиболее широко используются различные виды пространственной фильтрации скользящими окнами различного размера. В этом случае в обработку вовлекается некоторая, сравнительно небольшая, окрестность обрабатываемого элемента изображения.

Рассмотрим разбиение изображения на (возможно, пересекающиеся) полосы в направлении, перпендикулярном направлению построчного (постолбцового) сканирования. Этот способ удовлетворяет требованиям, обычно предъявляемым обработкой в реальном времени, снимает необходимость обмена промежуточными результатами между параллельными процессами выполнения локальных операций и легко реализуется как программно, так и аппаратно. Процесс сборки результирующего изображения состоит из действий, в точности противоположных разбиению.

Для проведения оценки эффективности многопроцессорной классификации, использующей поэлементное сканирование изображений, введем следующие обозначения:

$t_{вып}$ – время обработки одной строки (столбца) данных;

$t_{пер}$ – время пересылки одной строки (столбца) данных (включает в себя время пересылки при разбиении данных, время пересылки при сборке данных и время задержки, связанной с возможной несинхронной работой процессоров);

l – число задействованных процессоров;

n – число строк (столбцов) обрабатываемого изображения.

Определим параметр t как отношение времени пересылки ко времени выполнения

$$t = {}^{tпер}/_{t_{вып}} \qquad (12)$$

С учётом введенных обозначений была получена следующая формула, определяющая зависимость выигрыша от числа процессоров K(l) для алгоритмов, использующих поэлементное сканирование изображений

$$K(l) = \frac{1}{{}^{1}/_{l} + t} \qquad (13)$$

Максимальный выигрыш K_{max} в этом случае определяется выражением

$$K_{max} = \frac{1}{t} \qquad (14)$$

Несколько более сложным является процесс распараллеливания по данным задач предварительной обработки пространственной фильтрации скользящими окнами различного размера. В этом случае в обработку вовлекается некоторая окрестность обрабатываемого элемента изображения. Поэтому разбиение изображения необходимо осуществлять на пересекающиеся полосы в направлении, перпендикулярном направлению построчного (постолбцового) сканирования. Введем обозначение

w – размер окна используемого пространственного фильтра.

Выражение для определения выигрыша K в этом случае примет следующий вид

$$K = \frac{1}{1/l + t + t \cdot \frac{l}{n}(w-1)} \qquad (15)$$

А выражение для определения максимального значения выигрыша K_{max}

$$K_{\max} = \frac{1}{2\sqrt{t/n \cdot (w-1) + t}} \qquad (16)$$

Результаты исследований, описанных в главе 6, показывают, что эффективность использования распараллеливания по данным обработки изображений алгоритмами, использующими поэлементное сканирование, и скользящими пространственными фильтрами резко возрастает с уменьшением отношения времени пересылки к времени выполнения t в интервале значений 0,2 – 0. Для алгоритмов фильтрации скользящими окнами время выполнения возрастает пропорционально квадрату линейного размера окна, поэтому распараллеливание наиболее эффективно при использовании фильтров с окнами большого размера.

Заключение

Результаты исследований, представленные в данной работе, можно рассматривать как решение актуальной научной проблемы тематической обработки изображений земной поверхности на основе многоуровневых алгоритмов сегментации.

В ходе выполнения научно-исследовательских работ достигнута цель диссертации – разработаны теория и практическая методология тематической обработки на основе многоуровневой сегментации, с использованием структурно-пространственной модели исследуемых изображений. Определены пути повышения эффективности методов тематической обработки аэрокосмических изображений земной поверхности. Проведены экспериментальные исследования использования многоуровневых методов тематической обработки при решении различных практических задач.

Основные результаты и выводы диссертационной работы заключаются в следующем:

- Разработана теория и практическая методология тематической обработки на

основе многоуровневой сегментации, с использованием структурно - пространственной модели исследуемых изображений. Предложенный подход позволяет повысить достоверность дешифрирования изображений, со сложной структурой представленных на них объектов. Повышение достоверности достигается за счет организации процесса классификации на основе многоуровневой сегментации, использующей различные виды классификаторов и возможности использования на каждом уровне подмножества классификационных признаков оптимального для данного структурного элемента.

- Разработаны новые алгоритмы выделения точечных и малоразмерных объектов посредством локальной пороговой обработки с адаптивным выбором пороговых значений на основе оценки локального контраста. Использование этих алгоритмов позволяет автоматически выделять точечные и малоразмерные объекты с заданной вероятностью ложного обнаружения *F*.
- Результаты экспериментальных исследований показали, что использование методологии тематической обработки на основе многоуровневой сегментации позволяет существенно повысить достоверность дешифрирования значительного числа объектов.
- Разработанный в данной работе метод автоматизированного формирования временных серий тематических карт растительного покрова и грунтов по данным дистанционного мониторинга, обеспечивает формирование временных серий взаимосогласованных тематических карт, каждая из которых фиксирует размещение растительных ресурсов в определённый момент времени, а в совокупности такая серия характеризует динамику растительных ресурсов.
- Разработанные методы автоматического определения пространственного распределения изменений растительного покрова и грунтов по временным сериям взаимосогласованных тематических карт обеспечивают создание карт динамики. Такие карты позволяют оценить динамику за избранный отрезок времени и открывают возможности получения качественных и количественных оценок.
- Разработан метод многоуровневой тематической обработки радиолокационных изображений сверхвысокого разрешения. Проведенные исследования показали, чтоавтоматизированная тематическая обработка радиолокационных изображений сопряжена со значительными трудностями, вследствие чего, далеко не все объекты видимые на снимке могут быть выделены в автоматизированном режиме. Для организации автоматизированной тематической обработки необходимо использование различных модифицированных признаков и многоуров-

невой классификации.

- Разработана методика количественной оценки эффективности распараллеливания и расчёта оптимальной конфигурации вычислительного кластера для решения задач обработки изображений. Установлено, что эффективность использования распараллеливания обработки изображений алгоритмами, использующими поэлементное сканирование, и скользящими пространственными фильтрами резко возрастает с уменьшением отношения времени пересылки к времени выполнения t в интервале значений 0,2 – 0. Для алгоритмов фильтрации скользящими окнами время выполнения возрастает пропорционально квадрату линейного размера окна, поэтому распараллеливание наиболее эффективно при использовании фильтров с окнами большого размера.

Теоретические положения и практические методы многоуровневого дешифрирования, представленные в данной работе, явились основой для разработки эскизного и технического проектов на программное обеспечение технологии динамического дешифрирования при выполнении работ по комплексному проекту по теме «Технологии оценки состояния и динамики растительных ресурсов наземных экосистем на основе дистанционного мониторинга», выполняемому в рамках Федеральной Целевой Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007 - 2012 годы».

Результаты дешифрирования участков территории Московской области используются в ОАО «ГЕОЦЕНТР-МОСКВА» при выполнении работ в рамках Федеральной Программы «Ведение государственного мониторинга состояния недр Московской области».

Разработанные теория и методы многоуровневого дешифрирования внедрены в учебный процесс в Московском государственном университете геодезии и картографии по курсам «Тематическое дешифрирование снимков», «Технология тематической обработки данных дистанционного зондирования», «Дешифрирование аэрокосмических снимков», «Космический мониторинг», «Автоматизированные системы сбора и обработки результатов дистанционного зондирования».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 49 научных работ:
Основные результаты изложены в следующих рекомендованных ВАК журналах:

1. **Методика автоматизированного ландшафтного дешифрирования космических изображений.// Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. № 4 - М.: МИИГАиК, 1998, с.68-81. (Соавторы: Мелкий В.А., Игрицов М.А.).**

2. **Использование спектрально-контекстных признаков для автоматизированного дешифрирования аэрокосмических изображений земной поверхности. //Изв. Вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка, 2001. № 4. с. 80-85.**
3. **Адаптивный пороговый алгоритм для автоматического выделения на изображении малоразмерных объектов. //Изв. Вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка, 2002. № 1. С. 100-107.**
4. **Дешифрирование многозональных аэрокосмических изображений с использованием структурно-пространственной информации. //Изв. Вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка, 2003, № 6, с.54-66.**
5. **Автоматизированное выделение объектов заданного размера на аэрокосмических изображениях с использованием параллельной обработки. //Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка, 2004, № 3. с. 151-157. (Соавтор: Кочнова И.В.).**
6. **Технология автоматизированного дешифрирования данных тепловизионной аэросъёмки для мониторинга состояния теплотрасс. //Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка», 2004, № 4. с. 118-125.**
7. **Проблемы распараллеливания в задачах предварительной обработки изображений скользящими пространственными фильтрами // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. №6 - М.: МИИГАиК, 2004, с.55-61. (Соавторы: Малинников В.А., Кочнова И.В.).**
8. **Технология обработки многозональных космических снимков для целей почвенного картографирования // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка, 2008, № 2. с. 149- 155. (Соавтор: Мышляков С.Г.).**
9. **Автоматизированные методы оценки динамики пространственного распределения растительного покрова и грунтов по данным дистанционного мониторинга // Исследование Земли из космоса, 2010, № 2, с.63–74**
10. **Анализ спектральных характеристик тропической растительности Вьетнама и разработка методов дешифрирования на основе спектральных индексов // Изв. Вузов. «Геодезия и Аэрофотосъемка», 2011., № 3 , с. 74 – 77. (Соавтор: Чинь Ле Хунг).**
11. **Методы выявления динамики тропической растительности Вьетнама путем автоматизированного дешифрирования временных рядов многозональных снимков // Исследование Земли из космоса, 2011, № 3, с. 75 – 85. (Соавтор: Чинь Ле Хунг).**
12. **Оценка географических изменений элементов ландшафта северных территорий по данным многозональной космической съемки на примере Земли Франца - Иосифа и Новой Земли// Изв. Вузов. «Геодезия и Аэрофотосъемка», 2011., № 3 , с. 86 – 90. (Соавтор: Кочнова И.В.).**

Учебные пособия, рекомендованные УМО высших учебных заведений Российской Федерации по образованию в области геодезии и фотограмметрии для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Фотограмметрия и дистанционное зондирование»:

13. Ресурсно-экологическая картография //М.: Изд-во МИИГАиК, 2005, 196 с. (Соавтор: Сладкопевцев С.А).
14. Дешифрирование динамики растительного покрова и грунтов по материалам дистанционного зондирования//Учебное пособие//М.: Изд-во МИИГАиК, 2009, 128 с. (Соавтор: Миртова И.А.).

По теме диссертации опубликованы также следующие работы:

15. Отношение сигнал-шум при корелляционном анализе двумерных изображений. //Автоматизация процессов сбора и обработки информации. ВВИА им. Н.Е.Жуковского. Научно-методические материалы. Москва, 1989г. с. 71. (Соавторы: Д.К. Сигитов, В.Т. Федин).

16. Аппаратно-програмный комплекс автоматизированной диагностики оператора иридологическими методами //Материалы Международного научно-технического семинара “Моделирование и контроль качества в задачах обеспечения надёжности радиоэлектронных устройств”. Шауляй, 1992 г. с. 53. (Соавторы: Е.В. Баскакова, В.Г. Беликов).
17. Алгоритм локальной пороговой обработки для выделения точечных объектов на изображении //Материалы научно-технического семинара “Прикладные интеллектуальные системы”. Общество “Знание” РСФСР Москва, 1992 г. с.10. (Соавтор: В.Г. Беликов).
18. Методические указания по выполнению лабораторных работ по курсу: «Компьютерное тематическое дешифрирование аэрокосмических изображений». Для студентов специальности «Исследование природных ресурсов аэрокосмическими методами».- М., Изд. МИИГАиК, 1997. 21 с. (Соавторы: Мелкий В.А., Черниговский Ю.М., Сметанюк И.В.).
19. **Прогнозирование взрывных вулканических извержений по данным дистанционного зондирования //Изв. Вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка, 1998. №3. с.123-129. (Соавторы: Мелкий В.А., Долгополов Д.В., Черниговский Ю.М.).**
20. **Мониторинг сейсмической опасности Алтайско-Саянской складчатой зоны по данным дистанционного зондирования //Изв. Вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка, 1999. № 3. с. 107-118. (Соавторы: Мелкий В.А., Шитикова М.В.).**
21. **Возможности практического применения технологии автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков в целях мониторинга земель //Изв. Вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка, 1999. № 3. с. 99-112. (Соавторы: Мелкий В.А., Шитикова М.В., Игрицов М.А. Долгополов Д.В.).**
22. **Компьютерные технологии в картографировании экологических систем //Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка, 2003, № 5. с. 60-71. (Соавтор: Сладкопевцев С.А).**
23. Использование комплексных алгоритмов классификации для автоматизированного дешифрирования радиолокационных изображений земной поверхности сверхвысокого разрешения //Международная научно-техническая конференция, посвященная 225-летию МИИГАиК, Москва, 2004, с.54-61. (Соавторы: Малинников В.А., Кочнова И.В.).
24. Методические указания по выполнению лабораторной работы «Технология создания цифровых карт по материалам аэрокосмосъёмки сверхвысокого разрешения» по курсу: «Дистанционные методы изучения природных ресурсов». Для студентов специальности «Исследование природных ресурсов».- М., Изд. МИИГАиК, 2004. 10 с. (Соавторы: Кащенкова К.А.., Черниговский Ю.М.).
25. Предварительная обработка космических снимков размером более 20 МГБ медианным фильтром с большим размером окна на кластере рабочих станций с использованием параллельных вычислений //Методические указания. М.: МГУГиК, 2004. – 7 с. (Соавторы: Малинников В.А., Кочнова И.В.).
26. Методические указания по выполнению лабораторной работы «Автоматизированное тематическое дешифрирование аэрокосмических снимков методом выделения границ однородных областей» по курсу: «Технология тематической обработки данных дистанционного зондирования». Для студентов специальности «Исследование природных ресурсов». М., Изд. МИИГАиК, 2004. 8 с.
27. **Возможности применения космических методов в целях осуществления мониторинга земель крупнейших городов (на примере г. Москвы) // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. №2 - М.: МИИГАиК, 2005 , с. 89-108 (Соавторы: А.М. Кругляк, В.А. Леонтьев и др.).**
28. Методические указания по ведению топографического мониторинга территории

города Москвы по материалам космической съёмки для решения задач мониторинга фактического использования земель //Московский государственный университет геодезии и картографии. - М., 2004. - 48 с. - Библиогр.: 7 назв. - Рус. - Деп. в ВИНИТИ 23.11.2004 № 1838-В2004. (Соавторы: Антипов А.В., Зверев А.Т. и др.).

29. Проблемы и технология космического мониторинга городских земель. Экологические изыскания для проектирования, строительства и эксплуатации. Сборник докладов // Материалы V Научно-практической конференции «Экогеал-2005». М.: НИиПИ экологии города, Смоленск: Маджента, 2006. с. 61-64.
30. Разработка методов оценки динамики растительного покрова по материалам дистанционного мониторинга. 4-я Международная научно-практическая конференция «Геопространственные технологии и сферы их применения». Материалы конференции. – М.: Информационное агентство «ГРОМ», 2008.- с.32
31. **Визуальное дешифрирование панхроматических снимков сверхвысокого разрешения с целью определения топографических объектов урбанизированных территорий // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка, 2008, № 3. с. 98-111. (Соавторы: Малинников В.А., Сладкопевцев С.А).**
32. Автоматизированное дешифрирование природных экосистем побережья Красного моря по данным многозональной съемки КА Landsat 7/ сборник статей по итогам научно-технической конференции, посвященной 230-летию основания МИИГАиК.- вни.2.-част II-2009, с. 215-217. (Соавторы: Зверев А.Т., , Мутанна Маен.).
33. **Архитектура и принципы функционирования системы топографического мониторинга северных территорий России на основе данных спутниковых систем // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка, 2011, № 1. с. 87-95. (Соавторы: Малинников В.А., Зубков С.А., Милованова М.С.).**

Жирным шрифтом представлены публикации в рекомендованных ВАК журналах.