

На правах рукописи



Соловьева Александра Николаевна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ
АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ
НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНОЙ СЕМАНТИЧЕСКОЙ
СЕТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ**

05.13.01 — Системный анализ, управление
и обработка информации (в науке и технике)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ижевск — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ижевский государственный университет имени М. Т. Калашникова» (ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова»)

Научный руководитель: **Кучуганов Александр Валерьевич**,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Беляков Станислав Леонидович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»,
профессор кафедры информационно-аналитических
систем безопасности

Милич Владимир Николаевич,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
ФГБУН «Физико-технический институт Уральского
отделения Российской Академии наук»,
заведующий отделом исследования и диагностики
пространственных структур

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики
и оптики» (Университет ИТМО)**,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «20» апреля 2017 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.065.06 при ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» по адресу 426033 г. Ижевск, ул. 30 лет Победы, д. 2, 5 корпус ИжГТУ имени М. Т. Калашникова.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в научной библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» <http://www.istu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 426069 г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7, ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова»

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

В. Н. Сяктерев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из средств повышения эффективности функционирования технических систем, использующих зрительные данные, является автоматизация анализа изображений. Необходимость синтеза формализованного описания изображений без участия человека имеет место в задаче дешифрирования аэрокосмических снимков местности. Дешифрированием называется процесс выявления на аэрокосмических снимках объектов и особенностей местности, установления их количественных и качественных характеристик и условного их обозначения на карте или плане. При этом анализируются как признаки, непосредственно характеризующие визуальные свойства объектов местности (прямые дешифровочные признаки), так и их относительное расположение, приуроченность и взаимообусловленность (косвенные дешифровочные признаки).

Описание изображения может быть представлено в виде аннотаций или текста. Основным препятствием для автоматизации его построения является семантический разрыв — несоответствие уровней информации, которую компьютер может извлечь из визуальных данных, и интерпретации этих данных человеком. Человек способен оперировать как низкоуровневыми характеристиками изображения (цвет, текстура, форма), так и высокоуровневыми понятиями (объект, признак, действие), в то время как для компьютера доступны только низкоуровневые характеристики. Данное противоречие приводит к необходимости разработки методов преобразования информации о наборе точек растра в формализованное описание изображения, представленное в терминах логики и естественного языка.

Применение аэрокосмических снимков позволяет перенести основной объем работы по сбору информации о местности из полевых условий в камеральные. Ввиду необходимости учитывать множество взаимосвязанных факторов, полная автоматизация процесса дешифрирования представляет сложность. Результаты дешифрирования во многом определяются субъективными решениями оператора и его квалификацией. В современных геоинформационных системах (ГИС) автоматизация дешифрирования рассматривается с точки зрения статистического подхода и представлена классификацией областей изображения по заданным эталонам либо кластеризацией без эталонов (не всегда оптимальной), которые обязательно дополняются ручным редактированием и доработкой полученных классов. При обработке используются статистические характеристики изображения: для текстурных областей рассчитываются энергия, контраст и корреляция (на основе матрицы вхождений), средний цвет и дисперсия по каждому спектральному каналу, после чего выполняется классификация с использованием метода опорных векторов, деревьев решений, кластеризация с помощью алгоритма ISODATA и др. Таким образом, при дешифрировании учитываются только прямые дешифровочные признаки либо их комбинации. Чтобы не пропустить на снимке значимые объекты, требуется обеспечить высокое качество эталонов.

Обращение к структурному подходу для описания текстурных областей изображения предоставит возможность эксперту вместо накопления обучающих примеров описывать составные объекты через структуры объектов более низкого

уровня, а также использовать косвенные признаки дешифрирования, несущие значительную долю информации изображения. Комплексный анализ совокупности прямых и косвенных дешифровочных признаков и пространственных взаимосвязей между объектами с последующими логическими заключениями позволит более качественно интерпретировать аэрокосмические снимки.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам обработки и распознавания изображений уделено внимание в работах Ю. И. Журавлева, И. Б. Гуревича, Р. Гонсалеса, Р. Вудса, К. Фу. Существенный вклад в задачу обработки данных дистанционного зондирования Земли и аэрокосмических снимков внесли Ш. М. Дейвис, Д. А. Ландгребе, Т. Л. Филлипс, Ф. Х. Свейн, Р. М. Хоффер, Ю. Ф. Книжников, И. К. Лурье, Р. А. Шовенгердт и др.

Область исследований. Диссертация соответствует пунктам 4, 7, 12 Паспорта специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации»: п. 4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации; п. 7. Методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза и идентификации сложных систем; п. 12. Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации.

Объектом исследования являются изображения двумерных и трехмерных объектов.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы построения моделей изображений, отражающих их содержание.

Цель работы. Повышение достоверности автоматического дешифрирования прямых и косвенных признаков объектов местности за счет развития алгоритмов машинного построения формализованного описания изображений.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие **задачи**:

1. Исследование и анализ существующих методов и алгоритмов описания изображений и методик дешифрирования аэрокосмических снимков.
2. Разработка модели многоуровневого описания изображения.
3. Разработка методики автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков на основе геометрических функций, аппарата классической и нечеткой логики.
4. Разработка программной системы семантического кодирования изображений на основе разработанных модели и методики, исследование ее эффективности на реальных изображениях.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана модель изображения, отличающаяся представлением иерархически структурированных формализованных описаний границ цветовых областей в виде многоуровневой семантической сети, позволяющей интерпретировать описание границ цветовых областей в терминах предметной области.
2. Разработан новый алгоритм формирования границы текстурного объекта, отличающийся способом детализации выпуклого многоугольника, для перехода от низкоуровневых характеристик изображения к дешифровочному признаку формы.

3. Разработана методика автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков, использующая, помимо статистических характеристик, геометрические функции, аппарат классической и нечеткой логики, отличающаяся возможностью выполнять и интерпретировать запросы о значениях дешифровочных признаков и отношений.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработаны модель изображения и методика автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков, позволяющие сопоставить низкоуровневым характеристикам изображения иерархически структурированный комплекс высокоуровневых понятий.

На основе предложенных модели и методики разработана система семантического кодирования изображений, предназначенная для автоматизации дешифрирования аэрокосмических снимков. Теоретические результаты исследования были также применены для построения словесного портрета человека по фотографиям.

Методы исследования. Теоретические исследования выполнены с использованием методов системного анализа, теории множеств, теории графов, формальной логики, нечеткой логики, аналитической геометрии и линейной алгебры. Экспериментальные исследования выполнены с применением методов экспертных оценок в разработанной программной системе семантического кодирования изображений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Многоуровневая семантическая сеть, образованная описанием изображения на трех уровнях абстракции количественных и качественных характеристик, позволяющая при анализе изображения оперировать как низкоуровневыми признаками, так и терминами предметной области.

2. Разработанный алгоритм формирования границы текстурного объекта, отличающийся способом детализации выпуклого многоугольника, позволяющий управлять формой результирующего многоугольника через допустимую величину его углов.

3. Методика автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков, использующая геометрические функции и нечеткий логический вывод.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов и выводов подтверждается соответствием экспертных и программно рассчитанных характеристик объектов изображения, положительными результатами применения разработанной модели и методики на реальных данных.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: 1-й Форум молодых ученых в рамках Международного форума «Качество образования — 2008» (EQ-2008) (Ижевск, 23 апреля 2008 г.); 19-я Международная конференция по компьютерной графике и зрению «ГрафиКон'2009» (Москва, 5–9 октября 2009 г.); 2-й Форум молодых ученых в рамках Международного форума «Качество образования — 2010» (EQ-2010) (Ижевск, 22 апреля 2010 г.); I Всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов, посвященная 25-летию кафедры «Приборы и методы контроля качества» (Ижевск, 22–24 апреля 2010 г.); 20-я Международная конференция по компьютерной графике и зрению «ГрафиКон'2010» (Санкт-

Петербург, 20–24 сентября 2010 г.); 2-я Международная конференция «Трехмерная визуализация научной, технической и социальной реальности. Технологии высокополигонального моделирования» (Ижевск, 24–26 ноября 2010 г.).

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы в рамках госбюджетной темы № 4043 Госзаказ МОиН на 2012 год по теме «Разработка и экспериментальное исследование системы аэрокосмического и геоинформационного мониторинга для визуализации результатов геоэкологических исследований северных экосистем», а также для проведения практических занятий и оценки знаний студентов при изучении дисциплин «Геоинформационные системы» и «Геоинформационные системы и технологии» на кафедре «Автоматизированные системы обработки информации и управления» ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова», что подтверждено актами внедрения.

Тема диссертационной работы частично поддержана грантом Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 11-07-00632-а).

Публикация результатов. По материалам диссертации опубликовано 12 работ [1–12], в том числе 5 в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК при Минобрнауки РФ [1–5], 1 в издании Scopus [6]. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [13].

В работах [4, 12] соискателю принадлежат модель изображения, методика автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков и ее программная реализация. В работе [5] соискателю принадлежит алгоритм формирования многоугольника, моделирующего границу текстурного объекта. В работах [1–3] соискателю принадлежит методика вербализации изображений и ее программная реализация. В работах [6–11] соискателю принадлежит методика модификации типовой трехмерной модели по заданным фотоизображениям и ее программная реализация. Остальные результаты в работах [1–4, 6–12] принадлежат соавторам.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация содержит введение, 4 главы и заключение, список использованных литературных источников, содержащий 108 наименований, и приложения. Основной текст изложен на 177 страницах машинописного текста с иллюстрациями.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведена актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту, дано краткое содержание работы по главам.

Первая глава содержит аналитический обзор существующих методов автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков местности и современных направлений их развития. Рассмотрены подходы к представлению содержания изображения с помощью графов. Также выполнен обзор существующих алгоритмов оконтуривания объектов путем построения невыпуклой оболочки набора точек.

Результаты дешифрирования аэрокосмических снимков во многом определяются субъективными решениями оператора и его квалификацией. Ввиду необходимости учитывать множество взаимосвязанных факторов основной объем работы по оцифровке специалист выполняет самостоятельно с помощью инструментов векторизации.

Многие исследования в области автоматизации дешифрирования посвящены выделению на снимках отдельных категорий объектов местности: зданий, дорог, транспортных узлов, водных объектов и др. на основе распознавания характерных очертаний и спектральных образов в многозональных снимках. Другим распространенным подходом является классификация пикселей изображения по категории объектов местности, которые они представляют.

Предоставляемые в современных ГИС инструменты работают на низком (массив точек растра) и среднем (геометрические элементы) уровнях и соответственно используют специальную терминологию из области анализа данных, недостаточно наглядную для пользователя. Классификация выполняется на основе только прямых дешифровочных признаков. Полученные результаты обязательно дополняются ручным редактированием. В рамках подхода GEOBIA (Geographic Object-Based Image Analysis, объектно-ориентированный анализ географических изображений) реализуется обработка областей, полученных в результате автоматической сегментации (системы eCognition, Feature Analyst, ENVI Feature Extraction и др.), что позволяет укрупненно обрабатывать снимки высокого разрешения и сокращает ошибки классификации, вызванные шумом. Негативной для инструментов GEOBIA является тенденция к упрощению пользовательского интерфейса за счет скрытия механизмов выделения объектов.

Полная и корректная интерпретация изображения предполагает обращение к некоторой онтологии высокоуровневых понятий с сохранением возможности доступа к образующим их низкоуровневым объектам. Актуальна разработка модели иерархически структурированного многоуровневого описания изображения, предусматривающей описание изображения на низком, среднем и высоком уровне в терминах логики и естественного языка.

Дополнение набора инструментов дешифрирования средствами нечеткой логики позволяет моделировать неоднозначную интерпретацию изображения, в том числе неоднозначную классификацию его областей.

Таким образом, необходима разработка методики автоматизированного дешифрирования, позволяющей учитывать в явном виде прямые и косвенные дешифровочные признаки объектов местности, автоматизирующей операции по оконтуриванию объектов и предоставляющей возможность проконтролировать процесс логического вывода. Представление границ объекта в векторном виде позволяет использовать при анализе формы геометрические функции. Перевод процессов обработки и анализа изображения в терминологию предметной области может быть достигнут за счет представления характеристик объектов изображения с помощью лингвистических переменных.

Во **второй главе** рассматривается формализованная модель изображения, включающая растровую информацию, векторную информацию (границы и скеле-

ты цветовых сегментов), а также многоуровневую семантическую сеть, состоящую из простых, текстурных и значимых объектов.

В задаче дешифрирования аэрокосмических снимков нами выделяются следующие уровни описания изображения: 0) *растр*; 1) «*простые объекты*» — отдельные однородные области векторизованного изображения; 2) «*текстурные объекты*» — составные текстурные области, образованные скоплениями или геометрическим пересечением скоплений однородных областей со сходными характеристиками; 3) «*значимые объекты*» — объекты изображения, значимые для предметной области (например, дороги, водоемы, мосты); 4) *общая характеристика изображения* (например, характеристика экологического состояния местности). С точки зрения преобразования низкоуровневых характеристик изображения в высокоуровневые основной интерес представляют уровни 1–3. Уровень 0 в результирующем описании изображения напрямую не используется. Уровень 4 обобщает все полученные характеристики, а также может содержать текстовый комментарий пользователя.

Формализованная модель изображения M образована данными изображения и его описанием на нескольких уровнях:

$$M = (Raster, VectImage, Description),$$

где *Raster* — исходный растр,

VectImage — векторизованное изображение,

Description — описание изображения на трех уровнях абстракции количественных и качественных характеристик, представленное в форме семантической сети:

$$Description = ((PDescr, TDescr, SDescr), Links),$$

где *PDescr*, *TDescr*, *SDescr* — три слоя описания изображения, соответствующие уровням простых, текстурных и значимых объектов соответственно;

$$Links \subseteq (PDescr \times TDescr \cup PDescr \times SDescr \cup TDescr \times SDescr),$$

где \times — декартово произведение множеств, — отношение «часть-целое», связывающее слои семантической сети: между текстурными и образующими их простыми объектами; между значимыми объектами и представляющими их простыми или текстурными объектами (Рисунок 1).

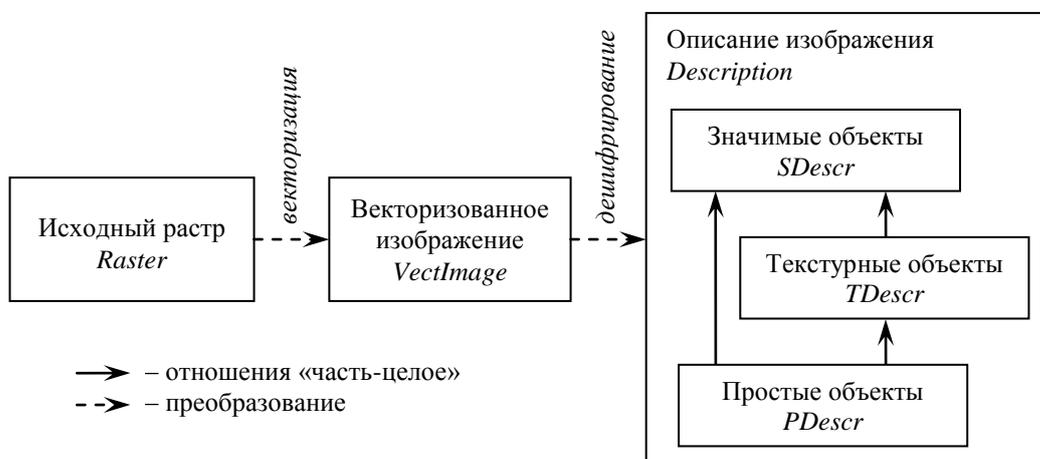


Рисунок 1 — Компоненты модели изображения

Каждый слой семантической сети *Description* представлен нечетким атрибутивным графом (V, R, A, L) , в котором вершины V (узлы семантической сети) соответствуют объектам на изображении, дуги R (связи семантической сети) — отношениям между объектами: вложенность, соседство, для значимых объектов — «класс-подкласс». Каждая вершина и каждая дуга графа характеризуется подмножеством атрибутов из множества A . Атрибутам, характеризующим непосредственно воспринимаемые глазом свойства объектов (визуальные признаки), сопоставлены лингвистические переменные из множества L .

Векторизованное изображение можно представить как $VectImage = \{Region_i\}$ — однородные области (цветовые сегменты), где $Region_i = (OuterChain_i, \{InnerChain_{ij}\}, \{SkelChain_{ik}\}, AvgColor_i)$, где $OuterChain_i$ — замкнутая цепочка, образующая границу области $Region_i$; $InnerChain_{ij}$ — замкнутые цепочки, образующие границы полостей области $Region_i$;

$SkelChain_{ik}$ — цепочки скелета области $Region_i$;

$AvgColor_i = (h_i, s_i, v_i)$ — средний цвет области $Region_i$,

где $h_i, s_i, v_i \in [0, 1]$ — значения компонент цветовой модели *HSV*.

Под цепочкой понимается совокупность последовательно соединенных геометрических примитивов (отрезков прямых или дуг окружностей) Цепочка скелета области — это цепочка, равноудаленная от ее границ.

Описание изображения *на уровне простых объектов* имеет вид атрибутивного графа:

$$PDescr = (PV, R, AtrPV, AtrPR),$$

где PV — множество вершин, образованных простыми объектами;

R — отношения, определяющие дуги;

$AtrPV$ — множество атрибутов вершин;

$AtrPR$ — множество атрибутов дуг.

Вершинами графа являются простые объекты изображения: $PV = VectImage = \{Region_i\}$.

Дуги R на уровне простых объектов соответствуют: а) отношениям *соседства* объектов; б) отношениям *вложенности* объектов. Отношения между парами объектов могут вводиться дополнительно через графический интерфейс.

$AtrPV$ — множество визуальных признаков, представляющих характеристики простых объектов (*атрибуты вершин*). Среди характеристик простых объектов отдельно выделяются характеристики формы: $AtrForm \subseteq AtrPV$.

В задаче дешифрирования рассматриваются следующие типы атрибутов вершин $AtrPV$: 1) *размер*: площадь относительно других объектов изображения или в абсолютных единицах; 2) *форма*: вытянутость, извилистость границы, ориентация, прямолинейность, правильность скруглений, плотность точек, геометрическая правильность границы, выраженность полостей и ветвей; 3) *тон*; 4) *цвет* и насыщенность; 5) *контрастность*: цветовая и яркостная.

$AtrPR$ — множество характеристик отношений между простыми объектами (*атрибуты дуг*). Рассматриваются следующие типы атрибутов дуг $AtrPR$: а) *местоположение*: относительное расположение по горизонтали и по вертикали,

расстояние, симметричность и др.; б) *сравнение*: относительная выраженность визуальных признаков $AtrPV$.

Описание изображения на уровне текстурных объектов имеет вид атрибутивного графа:

$$TDescr = (TV, R, AtrTV, AtrTR),$$

где TV — множество вершин, образованных текстурными объектами;

R — отношения, определяющие дуги;

$AtrTV$ — множество атрибутов вершин;

$AtrTR$ — множество атрибутов дуг.

Вершинами графа являются текстурные объекты изображения, каждый из которых образован множеством простых объектов: $TV \subseteq \mathcal{P}(PV) = \mathcal{P}(VectImage)$, где $\mathcal{P}(PV)$ — множество всех подмножеств PV . В семантической сети изображения текстурный объект связан с образующими его простыми объектами дугами отношения «часть-целое» (*Links*).

Текстурные объекты выделяются по результатам анализа описания изображения на уровне простых объектов $PDescr$ как множества простых объектов, образующих кластеры в пространстве визуальных признаков. Чтобы выделить на изображении геометрически разнесенные области, образованные схожими объектами, объекты дополнительно разбиваются на кластеры на основе расположения их геометрических центров (далее — геометрические кластеры).

Текстурный объект представляет собой геометрический кластер, образованный однородными областями изображения, принадлежащими одному кластеру пространства визуальных признаков (текстура, образованная однотипными элементами), или геометрическое пересечение на изображении нескольких таких кластеров (текстура, образованная разнотипными элементами).

Чтобы охарактеризовать форму текстурного объекта $Texture_i$, для него выполняется оконтуривание — формирование замкнутой границы $Hull(Texture_i)$.

Дуги R на уровне текстурных объектов соответствуют: а) отношениям *соседства* объектов; б) отношениям *вложенности* объектов; в) отношениям «целое-часть» между парами текстурных объектов.

$AtrTV$ — множество визуальных признаков, представляющих свойства текстуры (*атрибуты вершин*).

В задаче дешифрирования рассматриваются следующие типы атрибутов вершин $AtrTV$: 1) *структура*: по каждому атрибуту уровня простых объектов $atrPV_j \in AtrPV$ рассчитываются его среднее, максимальное и минимальное значения для простых объектов в составе $Texture_i$; 2) *форма*: для контура текстурного объекта $Hull(Texture_i)$ рассчитываются значения атрибутов формы: $atrForm_j(Hull(Texture_i))$, $atrForm_j \in AtrForm$; 3) *текстура*: зернистость, контрастность текстуры, направленность, линейность, регулярность, грубость очертаний элементов.

$AtrTR$ — множество характеристик отношений между текстурными объектами (*атрибуты дуг*). Рассматриваются следующие типы атрибутов дуг $AtrTR$: а) *местоположение*: атрибуты, аналогичные применяющимся на уровне простых объектов (в качестве геометрического центра текстурного объекта используется

геометрический центр его контура); б) *сравнение*: относительная выраженность визуальных признаков $AtrTV$.

Описание изображения на уровне значимых объектов имеет вид атрибутивного графа:

$$SDescr = (SV, R, AtrSV, AtrSR),$$

где SV — множество вершин, образованных значимыми объектами;

R — отношения, определяющие дуги;

$AtrSV$ — множество атрибутов вершин;

$AtrSR$ — множество атрибутов дуг.

Вершинами графа являются значимые (для предметной области) объекты изображения, которые могут быть представлены 1) группами простых или текстурных областей (площадные объекты: леса, пруды и др.), 2) цепочками (линейные объекты: на мелкомасштабных изображениях к ним относятся дороги, реки и др.) или 3) точками плоскости (точечные объекты: отдельные строения, колодцы и др.). В семантической сети изображения значимый объект связан с образующими его текстурными и простыми объектами отношением «часть-целое» (*Links*).

Дуги R на уровне значимых объектов соответствуют: а) отношениям *соседства* объектов; б) отношениям *вложенности* объектов; в) отношениям «целое-часть» (например, между объектами классов «Лес» и «Дерево»); г) отношениям «класс-подкласс» (например, между объектами классов «Дорога» и «Грунтовая дорога»).

Атрибуты вершин $AtrSV$ представлены атрибутом класса объекта и множеством визуальных признаков $atrSV_j$, представляющих свойства значимого объекта: $AtrSV = \{Класс\} \cup \{atrSV_j\}$. Перечень признаков определяется классом объекта. Например, объекты класса «Лес» обладают атрибутами *Тип деревьев*, *Средняя высота*, *Среднее расстояние между деревьями*.

$AtrSR$ — множество характеристик отношений между значимыми объектами (*атрибуты дуг*). Рассматриваются следующие типы атрибутов дуг $AtrSR$: а) *местоположение*; б) *сравнение*: относительная выраженность визуальных признаков $atrSV_j$.

Выделение значимых объектов осуществляется по результатам поиска на уровнях простых и текстурных объектов $PDescr \cup TDescr$ сочетаний значений атрибутов, удовлетворяющих ограничениям запроса.

Формирование описания изображения производится посредством запросов следующих типов к семантической сети: 1) по указанному пользователем единственному объекту; 2) по указанной паре объектов; 3) по классу значимых объектов (тематический слой); 4) по всему изображению (обход всей семантической сети). В процессе выполнения запросов формируются иерархически структурированные описания границ цветовых областей. Множества атрибутов вершин и дуг на всех уровнях описания изображения $AtrPV \cup AtrPR \cup AtrTV \cup AtrTR \cup AtrSV \cup AtrSR$ включают в себя как атрибуты, принимающие только числовые значения (например, *Количество полостей*), так и нечеткие атрибуты a , которым в дополнение к числовому значению сопоставлена лингвистическая переменная $L(a)$ с множеством значений T_a . Значения лингвистических переменных, степень принадлежности которым характеристик конкретной вершины или дуги семантической сети

превышает заданное пороговое значение θ , используются в роли качественных значений атрибутов при формировании словесных описаний.

В третьей главе рассматривается методика автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков на основе нечеткой логики. Приведены формулы расчета количественных значений признаков дешифрирования, описан переход от количественных значений признаков дешифрирования к качественным характеристикам, представлены алгоритм формирования границы текстурного объекта путем построения невыпуклой оболочки набора точек, алгоритм выделения значимых объектов на изображении.

В рамках описанной модели изображения M дешифрирование предлагается выполнять с применением следующей методики:

1. Векторизация растрового изображения.
2. Настройка функций принадлежности лингвистических значений качественных характеристик с учетом задач дешифрирования и характера снимка.
3. Формирование уровня простых объектов $PDescr$ в семантической сети изображения.
 - 3.1. Формирование сети вершин и дуг (PV, R) графа $PDescr$.
 - 3.2. Расчет и фаззификация значений визуальных признаков простых объектов и отношений между ними. Заполнение атрибутов вершин $AtrPV$ и атрибутов дуг $AtrPR$ слоя $PDescr$.
4. Формирование уровня текстурных объектов $TDescr$ в семантической сети изображения.
 - 4.1. Выделение и оконтуривание текстурных объектов TV .
 - 4.2. Формирование сети вершин и дуг (TV, R) графа $TDescr$. Построение дуг отношения «часть-целое» $Links \subseteq PV \times TV$.
 - 4.3. Расчет и фаззификация значений визуальных признаков текстурных объектов и отношений между ними. Заполнение атрибутов вершин $AtrTV$ и атрибутов дуг $AtrTR$ графа $TDescr$.
5. Формализация правил выделения значимых объектов на изображении в терминах визуальных признаков простых и текстурных объектов.
6. Формирование уровня значимых объектов $SDescr$ в семантической сети изображения.
 - 6.1. Выделение и оконтуривание значимых объектов SR .
 - 6.2. Формирование сети вершин и дуг (SV, R) графа $SDescr$. Построение дуг отношения «часть-целое» $Links \subseteq PV \times SV \cup TV \times SV$.
 - 6.3. Расчет и фаззификация значений визуальных признаков значимых объектов и отношений между ними. Заполнение атрибутов вершин $AtrSV$ и атрибутов дуг $AtrSR$ графа $SDescr$.

Результатом применения описанной методики является комплекс из исходного растра и семантической сети.

В задаче автоматизации дешифрирования аэрокосмических снимков визуальные признаки, применяемые при анализе изображения, называются дешифровочными признаками.

Для каждого простого объекта $Region_i$ количественные значения дешифровочных признаков рассчитываются с помощью эвристических алгоритмов. Для

них выполняется фазсификация. На рисунке 2 приведен результат отбора простых объектов, обладающих различными качественными характеристиками, отражающих выраженность признака *Плотность точек границы*.



Рисунок 2 — Оценка плотности точек границы (источник снимка: Google, DigitalGlobe):
 а — однородные области, отобранные по запросу *Плотность точек границы = Высокая*;
 б — однородные области, отобранные по запросу *Плотность точек границы = Низкая*

Выделение *текстурных объектов* производится по результатам двухэтапной кластеризации множества простых объектов: 1) в пространстве дешифровочных признаков; 2) геометрической в пределах каждого из полученных кластеров.

Описание формы текстурной области выполняется посредством анализа формы ее границы. По аналогии с задачей построения выпуклой оболочки множества точек, рассматриваемой в вычислительной геометрии, задачу моделирования границы (оконтуривания) текстурной области можно представить как построение невыпуклой оболочки множества точек, образованного точками границ векторных объектов либо их геометрическими центрами. Нами разработан алгоритм построения невыпуклой оболочки множества точек S , где под невыпуклой оболочкой понимается многоугольник P без самопересечений. Вершинами многоугольника являются точки множества S , остальные точки из S лежат внутри него.

Для одного множества точек можно построить несколько невыпуклых оболочек. Принимается ограничение на размер внутренних углов многоугольника: внутренние углы P не должны превышать значение $(360^\circ - \alpha)$, где $\alpha \in (0; 180^\circ]$ — показатель гладкости оболочки, и не могут быть меньше β , где $\beta \in (0; 180^\circ]$ — минимальный допустимый угол невыпуклой оболочки.

На каждом шаге из выпуклой оболочки вычитается треугольник, образованный ребром оболочки и внутренней точкой, в котором угол, противолежащий ребру оболочки, не меньше заданного значения α , и во внутреннюю область которого не попадают другие внутренние точки (Рисунок 3).

Далее приведен алгоритм построения невыпуклой оболочки для множества точек. *Входными данными* алгоритма являются $S = \{s_i\}_{i=1}^n$, $s_i \in \mathbb{R}^2$ — множество точек плоскости; $\alpha \in (0; 180^\circ]$ — показатель гладкости оболочки; $\beta \in (0; 180^\circ]$ — минимальный допустимый угол невыпуклой оболочки. Пусть функция

$ConvexHull(S)$ возвращает выпуклую оболочку множества точек S в виде многоугольника $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$, где $p_j \in S, j = 1, 2, \dots, m$. Обозначим также величину угла между отрезками a и b как $\angle(a, b)$.

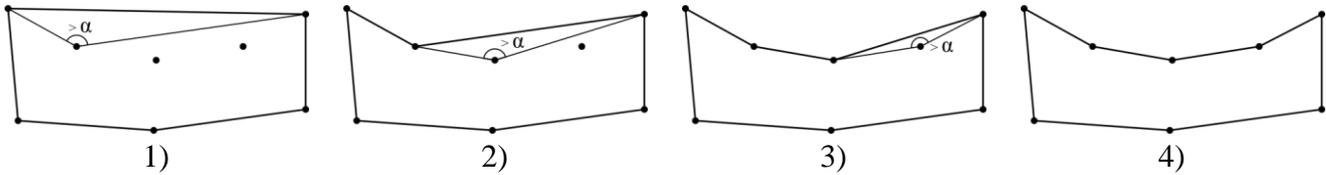


Рисунок 3 — Добавление точек в невыпуклую оболочку

Алгоритм построения невыпуклой оболочки $ConcaveHull(S, \alpha, \beta)$

- 1 $P = ConvexHull(S)$;
- 2 $Q = S \setminus P$ (множество Q содержит точки S , лежащие внутри P);
- 3 Пока $Q \neq \emptyset$:
- 4 Выбрать точку $s \in Q$.
- 5 $V = \emptyset$.
- 6 Для $i = 1, 2, \dots, |P|$: (перебираются вершины p_i многоугольника P)
- 7 $AngleA_i = \angle(sp_i, sp_{i+1})$;
- 8 $AngleB_i = \angle(p_i p_{i-1}, p_i s)$;
- 9 $AngleC_i = \angle(p_{i+1} s, p_{i+1} p_{i+2})$;
- 10 Если ни отрезок sp_i , ни отрезок sp_{i+1} не пересекают ребра многоугольника P и $\Delta p_i s p_{i+1}$ не содержит точек множества $Q \setminus \{s\}$,
- 11 $V = V \cup \{p_i\}$;
- 12 Упорядочить точки $p_k \in V$ по убыванию соответствующего им значения $AngleA_k$;
- 13 Пока $V \neq \emptyset$:
- 14 Выбрать первый элемент в упорядоченном множестве V . Пусть это точка $p_k, k \in \{1, 2, \dots, |P|\}$;
- 15 Если $AngleA_k \geq \alpha$ и $AngleB_k \geq \beta$ и $AngleC_k \geq \beta$,
- 16 Добавить в P вершину s между вершинами p_i и p_{i+1} ;
- 17 $V = \emptyset$;
- 18 Иначе $V = V \setminus \{p_k\}$;
- 19 Если $s \in P$ (точка s была добавлена в многоугольник P),
- 20 $Q = S \setminus P$ (обновить список точек, лежащих внутри P);
- 21 Иначе $Q = Q \setminus \{s\}$;
- 22 Если $Q \neq \emptyset$, вернуться к строке 4;
- 23 $ConcaveHull = P$.

Для каждого текстурного объекта $Texture_i$ с помощью эвристических алгоритмов рассчитываются значения количественных и качественных характеристик, соответствующих его дешифровочным признакам.

При выделении *значимых объектов* на изображении формируются тематические слои, каждый из которых соответствует некоторому классу объектов мест-

ности и образован простыми и текстурными объектами. Для выделения значимых объектов формируется запрос к семантической сети

$$Query = (QV, QE, QA),$$

где QV – множество классов значимых объектов;

QE – отношения между значимыми объектами соответствующих классов;

QA – множество атрибутов как значимых объектов, так и отношений между ними.

В QA каждому классу объектов $qv_i \in QV$ сопоставлена логическая комбинация утверждений вида $f(Obj) = t$, где $f \in AtrPV \cup AtrTV$ — визуальный признак объекта класса qv_i , $t \in T_f$ — одно из словесных значений, которые может принимать f . Атрибуты этого вида задают прямые дешифровочные признаки, которыми должны обладать значимые объекты соответствующего класса (их непосредственные визуальные признаки). Для комбинирования утверждений используются операции конъюнкции, дизъюнкции и отрицания.

Истинность утверждения $f(Obj) = t$ для конкретного объекта изображения Obj_k соответствует степени принадлежности характеристик объекта Obj_k значению t лингвистической переменной, сопоставленной признаку f . Степень истинности составных утверждений о визуальных признаках рассчитывается по правилам нечеткой логики.

Аналогично, каждой паре $(qv_1, qv_2) \in QE$ сопоставлена логическая комбинация утверждений о характерных отношениях между значимыми объектами соответствующих классов. Атрибуты этого вида задают косвенные дешифровочные признаки, характеризующие значимые объекты одного класса через свойства и пространственное расположение объектов других классов.

Для формирования тематических слоев выполняется три обхода запроса:

1. Для каждого класса объектов qv_i выполняется отбор объектов изображения с необходимым значением степени истинности утверждений $\theta_{необх}$ о соответствующем классе (прямые дешифровочные признаки).

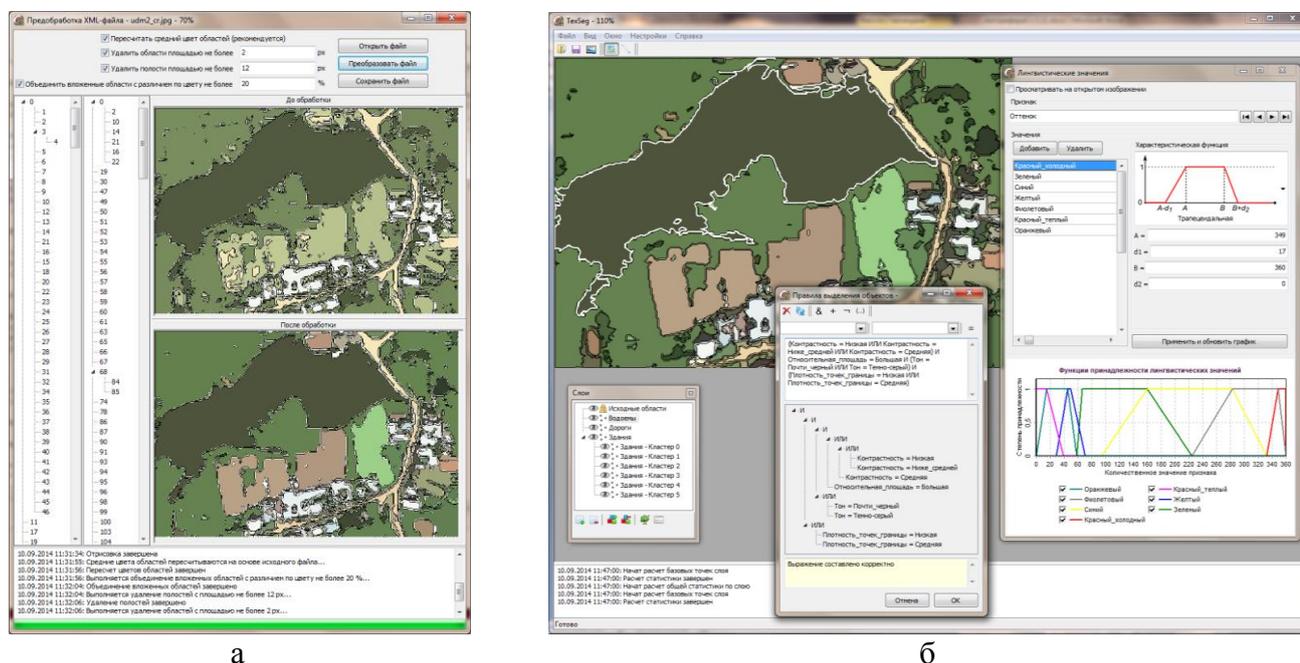
2. Рассчитываются степени истинности утверждений о связях между значимыми объектами (косвенные дешифровочные признаки).

3. Для каждого объекта рассчитывается взвешенная сумма значений степени истинности утверждений о прямых и косвенных дешифровочных признаках и выполняется ее сравнение с достаточным значением $\theta_{дост}$. При достижении степени истинности $\theta_{дост}$ объект Obj_k добавляется в тематический слой.

В **четвертой главе** описывается построение и реализация программной системы семантического кодирования изображений TexSeg, основанной на предложенной формализованной модели изображения и методике дешифрирования аэрокосмических снимков. Приводятся методические рекомендации по обработке изображений в разработанной системе, результаты экспериментов по дешифрированию аэрокосмических снимков.

Разработанная система позволяет автоматизировать выделение на снимках значимых объектов местности, анализ их характеристик и построение границ для дальнейшего обозначения на карте (Рисунок 4). Пользователь может дополнять правила выделения значимых объектов во встроенном интерпретаторе, используя

словесные формулировки значений дешифровочных признаков, а также настраивать функции принадлежности для значений лингвистических переменных. Работоспособность системы проверена на 150 снимках Landsat-7, а также на 50 снимках, полученных с помощью сервиса «Google Планета Земля».



а

б

Рисунок 4 — Пример работы системы семантического кодирования TexSeg:

а — окно модуля предобработки векторизованных аэрокосмических снимков;

б — пример выделения водоемов на изображении (открыты окно слоев, окно настройки правил выделения объектов, окно настройки значений лингвистических переменных)

Релевантность применяемых формул расчета значений количественных характеристик простых объектов и текстурных объектов оценивается путем сопоставления значений количественных характеристик, рассчитанных в системе, с результатами экспертного ранжирования однородных и текстурных областей по соответствующим характеристикам. Для экспертной оценки значений признаков простых объектов использован набор из 15 однородных областей, случайным образом выбранных в файле аэрокосмического снимка (Рисунок 5, а). Экспертная оценка значений признаков текстурных объектов выполнена для 13 векторизованных эталонных текстур из базы данных VisTex (Рисунок 5, б). Результаты оценки релевантности вычислений приведены в таблице 1 и составили соответственно 84% для простых объектов и 71% для текстурных объектов.

Функции принадлежности значений лингвистических переменных, представляющих характеристики объектов, формируются экспертом на основе матриц парных сравнений. Правила выделения значимых объектов на изображении составляются на основе справочников дешифровочных признаков.

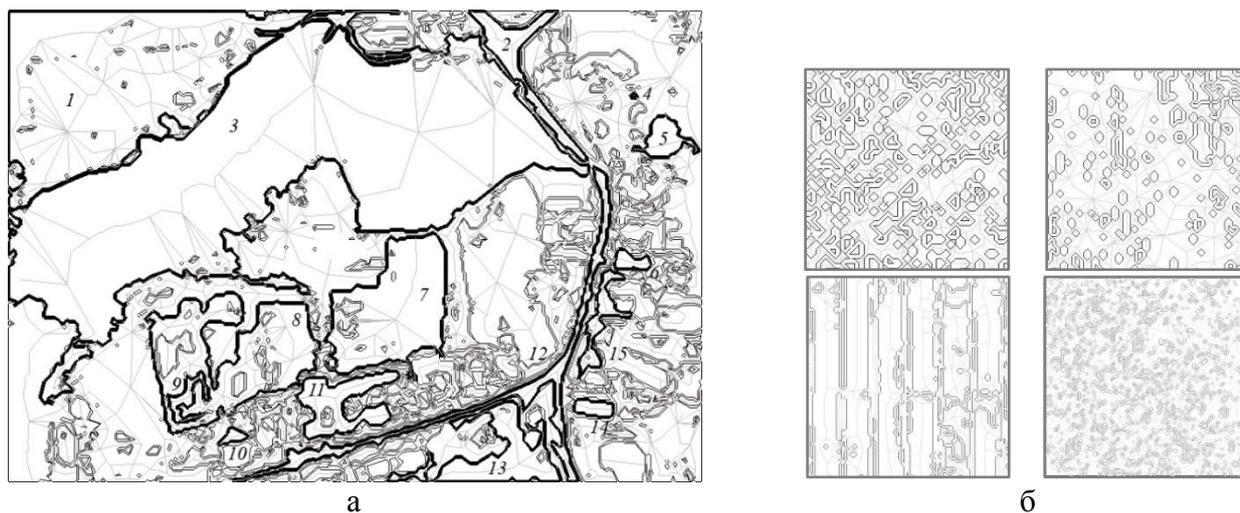


Рисунок 5 — Проверка корректности формул расчета признаков простых объектов:
 а — анализируемые области проверочного изображения; б — примеры эталонных текстур
 для оценки дешифровочных признаков текстуры

Таблица 1 — Результаты сопоставления экспертной оценки значений признаков с рассчитанными значениями

Наименование количественной характеристики	Релевантность вычисления	Наименование количественной характеристики	Релевантность вычисления
<i>Характеристики простых объектов</i>			
Вытянутость	83%	Выраженность полостей	93%
Извилистость границы	83%	Площадь относительно других объектов	97%
Выраженность ветвей	68%	Цвет	87%
Ориентация	84%	Насыщенность	83%
Прямолинейность границы	82%	Тон	91%
Правильность скруглений границы	89%	Тоновая контрастность	82%
Плотность точек границы	71%	Среднее значение	84%
<i>Характеристики текстурных объектов</i>			
Зернистость	65%	Регулярность	73%
Контрастность	69%	Грубость очертаний элементов	77%
Направленность	75%		
Линейность	65%	Среднее значение	71%

Оценка качества выделения значимых объектов на аэрокосмических снимках с помощью разработанной системы выполнена для 20 спутниковых снимков территории Удмуртской Республики (источник снимков: Google, Digital Globe). На снимках выделены значимые объекты, характерные для данной местности: здания и теплицы, огороды, дороги, водоемы, ручьи, деревья, луга. В ходе эксперимента выполнено сравнение результатов машинного дешифрирования в разработанной системе (Рисунок 6, а) с результатами ручного дешифрирования изображения экспертами (Рисунок 6, б) по показателям точности, полноты и вероятности пропуска объектов.



Рисунок 6 — Пример выделения на изображении зданий и теплиц (источник снимка: Google, DigitalGlobe): а — результат автоматического выделения объектов; б — результат выделения объектов экспертом

Показатель *точности* выделения значимых объектов рассчитывается как отношение площади объектов, верно дешифрованных в системе, к площади значимых объектов, выделенных в системе. Показатель *полноты* рассчитывается как отношение площади объектов, верно дешифрованных в системе, к площади значимых объектов, выделенных экспертом. По результатам исследований точность и полнота выделения объектов составили 92% и 93% соответственно; таким образом, разработанная программная система позволяет автоматизировать 92% операций по выделению объектов на аэрокосмических снимках по сравнению с ручным дешифрированием по изображению. *Вероятность пропуска значимых объектов* является дополнением к показателю полноты: $100\% - 93\% = 7\%$ (Таблица 2). Точность оконтуривания текстурных объектов в системе оценивается как отношение числа выделенных текстурных объектов, для которых автоматически сформированные контуры не требуют корректировки, к общему числу текстурных объектов изображения, и составила в среднем по всему комплекту снимков 96%.

Таблица 2 — Оценка точности и полноты выделения значимых объектов, вероятности пропуска значимых объектов в системе семантического кодирования

Класс значимых объектов	Точность	Полнота	Вероятность пропуска объектов
Здания и теплицы	82,06	87,08	12,92
Огороды	99,56	86,13	13,87
Дороги	79,13	86,04	13,96
Водоемы	94,44	100,00	0,00
Ручьи	90,61	100,00	0,00
Деревья	97,12	93,21	6,79
Луга	95,42	94,76	5,24
Тени	97,84	94,56	5,44
Среднее значение	92,02	92,72	7,28

В таблицах 3, 4 приведено сравнение показателей точности и полноты выделения значимых объектов в системе TexSeg с результатами аналогичных исследований, проведенных другими авторами для существующих систем, реализующих объектно-ориентированный анализ географических изображений: eCognition, Feature Analyst, ENVI Feature Extraction.

В отличие от существующих систем, в системе TexSeg, разработанной на основе предложенных модели и методики, текстурные и значимые объекты, сохраняя характеристики своих составных элементов (простых объектов), интерпретируются как самостоятельные целостные узлы соответствующих слоев семантической сети, которые обладают собственными атрибутами, что реализует свойство эмерджентности изображения.

В существующих системах анализ формы объектов выполняется путем их сопоставления с обобщенными типовыми формами (прямоугольников, эллипсов и др.). Система TexSeg анализирует форму границ, аппроксимированных отрезками прямых и дугами окружностей. Это позволяет выделять классы значимых объектов, не обладающие характерным цветом и тоном, но со значительно выраженными характерными признаками формы.

Анализ пространственных отношений и отношений сравнения по выраженности характеристик, позволяющий существенно повысить точность выделения значимых объектов, в разработанной системе применим не только на уровне простых объектов, как в существующих системах, но и на уровнях текстурных и значимых объектов, что способствует повышению достоверности автоматического дешифрирования.

Таким образом, система TexSeg по точности и полноте дает результаты, сопоставимые с известными системами автоматизации дешифрирования, но за счет дополнительных средств анализа формы и отношений между объектами позволяет извлекать дополнительные характеристики объектов.

В **приложении** приведены описание применения разработанных модели и методики в задаче синтеза словесного портрета человека по фотографиям, акты о внедрении результатов диссертационной работы.

Таблица 3 — Сравнение точности выделения значимых объектов в системе TexSeg и системах объектно-ориентированного анализа географических изображений

	eCognition (X.Sun, J.Zhang, Z.Liu, 2005)	eCognition (L.Huang, L.Ni, 2008)	eCognition (Md.D.Rahman, S.K.Saha, 2008)	eCognition (L.A.Arroyo, K.Johansen, S.Phinn, 2010)	Feature Analyst (N.D.Riggan, Jr., R.C.Weih, Jr., 2009)	Feature Analyst (M. Králová, 2013)	ENVI Feature Extraction (M.C.Petria, 2015, на основе продук- ционных правил)	ENVI Feature Extraction (M.C.Petria, 2015, на основе эталонов)	<i>TexSeg</i>
Водоемы	90,91	90	100	83,9	89,5	99	100	100	92,53
Здания	90	84,22	96,58	98,6	85,9	96	100	89,47	82,06
Дороги	75	80,49			86,8	95	99,73	97,67	79,13
Посадки аг- рокультур			89,79	87,2		97			99,56
Луга		94,12	87,95	48,6	91,2	96	99,4	85,5	95,42
Леса	68,18			98,3	78,6	99	100	96,21	97,12
Тени	100						47,79	97,67	97,84
<i>Среднее значение</i>	84,82	87,21	93,58	83,32	86,4	97	91,15	94,42	91,95

Таблица 4 — Сравнение полноты выделения значимых объектов в системе TexSeg и системах объектно-ориентированного анализа географических изображений

	eCognition (X.Sun, J.Zhang, Z.Liu, 2005)	eCognition (L.Huang, L.Ni, 2008)	eCognition (Md.D.Rahman, S.K.Saha, 2008)	eCognition (L.A.Arroyo, K.Johansen, S.Phinn, 2010)	Feature Analyst (N.D.Riggan, Jr., R.C.Weih, Jr., 2009)	Feature Analyst (M. Králová, 2013)	ENVI Feature Extraction (M.C.Petria, 2015, на основе продук- ционных правил)	ENVI Feature Extraction (M.C.Petria, 2015, на основе эталонов)	<i>TexSeg</i>
Водоемы	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Здания	73,34	88,79	80,11	95,9	85,9		99,99	92,63	87,08
Дороги	60	57,89			94,3	93	100	96,95	86,04
Посадки агрокультур			92,52	92,1		99			86,13
Луга		100	95,2	45,7	83,8	100	99,85	68,66	94,76
Леса	100			65,3	76,23	96	94,01	82,98	93,21
Тени	80						100	96,95	94,56
<i>Среднее значение</i>	82,67	86,67	91,96	79,8	88,05	97,6	98,98	89,7	91,68

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой изложено новое научно обоснованное техническое решение задачи, заключающейся в повышении достоверности автоматического дешифрирования прямых и косвенных признаков объектов местности за счет развития алгоритмов машинного построения формализованного описания изображений, имеющей существенное значение для развития страны.

В ходе диссертационного исследования получены следующие основные результаты и выводы:

1. Исследованы существующие методы и алгоритмы описания изображений, методики дешифрирования аэрокосмических снимков. Показана необходимость в разработке методов и алгоритмов, позволяющих реализовать комплексный анализ совокупности как прямых, так и косвенных дешифровочных признаков.

2. Разработана формализованная модель изображения в виде семантической сети, отличающейся наличием трех слоев, отображающих количественные и качественные характеристики простых, текстурных и значимых объектов, а также отношения между ними.

3. Разработан новый алгоритм формирования границы текстурного объекта. Алгоритм применяется для анализа дешифровочного признака формы и отличается построением невыпуклой оболочки по допустимой величине углов результирующего многоугольника для повышения релевантности восприятию эксперта. Точность оконтуривания значимых объектов с помощью алгоритма составляет 96%.

4. Разработана методика автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков, позволяющая интерпретировать характеристики объектов с точки зрения как статистических показателей, так и визуальных свойств объектов, а также анализировать пространственные отношения между объектами изображения. Методика основана на использовании аппаратов классической и нечеткой логики.

5. Проведено экспериментальное исследование разработанной методики в задаче дешифрирования аэрокосмических снимков местности, подтверждающее повышение достоверности дешифрирования прямых и косвенных признаков объектов местности. По результатам сопоставления значений количественных характеристик, рассчитанных в системе, с результатами экспертного ранжирования, выполнена оценка релевантности вычисления значений характеристик простых и текстурных объектов, которая составляет 84% и 71% соответственно. Выполнена оценка точности (92%) и полноты (93%) выделения значимых объектов на снимках, вероятности пропуска значимого объекта (7%), точности оконтуривания значимых объектов (96%).

Таким образом, программная система, разработанная на основе методики, позволяет автоматически выполнить 92% операций по выделению объектов на аэрокосмических снимках, что сокращает субъективность дешифрирования.

Разработанная система по точности и полноте дает результаты, сопоставимые с известными системами автоматизации дешифрирования, но за счет допол-

нительных средств анализа формы и отношений между объектами позволяет получать дополнительные характеристики объектов. Например, отличать искусственные объекты от природных, описывать указанные объекты конкретными последовательностями прямых, дуг и углов между ними, в частности, с целью изучения динамики объектов и явлений по разновременным снимкам.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ:

1. Соловьева, А. Н. Алгоритмы вербализации изображений на примере словесного портрета человека / А. В. Кучуганов, А. Н. Соловьева // Известия Волгоградского государственного технического университета : межвуз. сб. науч. ст. № 4(91) / ВолгГТУ. — 2012. — С. 60–64. — (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 13).
2. Соловьева, А. Н. Распознавание характерных точек по фотографиям в экспертной системе построения словесного портрета / А. В. Кучуганов, А. Н. Соловьева // Известия Волгоградского государственного технического университета : межвуз. сб. науч. ст. № 10(97) / ВолГТУ. — 2012. — С. 92–97. — (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 14).
3. Соловьева, А. Н. Описание содержания изображений на ограниченном естественном языке / А. В. Кучуганов, А. Н. Соловьева // Вестник Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова. — 2012. — № 4(56). — С. 153–157.
4. Соловьева, А. Н. Многоуровневое описание аэрокосмических снимков в задаче автоматизированного дешифрирования / А. В. Кучуганов, А. Н. Соловьева // Интеллектуальные системы в производстве. — 2014. — № 2(24). — С. 164–166.
5. Соловьева, А. Н. Построение многоугольников, моделирующих границы текстурных областей на аэрокосмическом снимке / А. Н. Соловьева // Интеллектуальные системы в производстве. — 2014. — № 2(24). — С. 167–168.

Статьи в изданиях Scopus:

6. Solovyova, A. N. Using Contours and Colour Region Boundaries of Photographs in Sculptural Portrait Design / A. N. Solovyova, A. V. Kuchuganov // ГрафиКон'2009: 19-я Междунар. конф. по компьютерной графике и зрению : Тр. конф. — М. : МАКС Пресс, 2009. — С. 315–316.

Прочие публикации:

7. Solovyova, A. N. Automatization of Sculptural Portrait Design / A. N. Solovyova, V. V. Kharin // First Forum of Young Researchers. In the framework of Intern. Forum "EQ-2008" : Proc. — Izhevsk : Publishing House of ISTU, 2008. — P. 63–68.
8. Solovyova, A. N. Using Generic Wireframe Parametrization in Sculptural Portrait Design / A. N. Solovyova, A. V. Kuchuganov // Second Forum of Young Research-

- ers. In the framework of Intern. Forum “Education Quality — 2010” : Proc. (Apr. 22, 2010, Izhevsk, Russia). — Izhevsk : Publishing House of ISTU, 2010. — P. 163–170.
9. Solovyova, A. N. The Method for Sculptural Portrait Synthesis Using Colour Region Boundaries of Photographs / A. N. Solovyova // Измерение, контроль и диагностика : Тр. I Всерос. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, посвящ. 25-летию каф. Приборы и методы контроля качества (Ижевск, 22-24 апр. 2010 г.). — Ижевск, 2010. — С. 171–174.
 10. Соловьева, А. Алгоритм модификации типового трехмерного портрета по заданным фотоизображениям / А. Соловьева // ГрафиКон’2010: 20-я Междунар. конф. по компьютерной графике и зрению : Тр. конф. — СПб. : Университетские коммуникации, 2010. — С. 346–347.
 11. Соловьева, А. Н. Автоматизация проектирования скульптурных портретов на основе фотоизображений / А. В. Кучуганов, А. Н. Соловьева // 2-я Междунар. конф. «Трехмерная визуализация научной, технической и социальной реальности. Технологии высокополигонального моделирования» : Тр. конф. — Ижевск, 2010. — С. 62–66.
 12. Solovyova, A. N. Automation of aerial and satellite image interpretation [Electronic resource] / A. N. Solovyova, A. V. Kuchuganov // Proceedings of the 2016 conference on Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine (ITSMSSM 2016). — Electronic data (1 file: 1 784 Kbytes). — Amsterdam, 2016. — Mode of access: http://www.atlantispress.com/php/download_paper.php?id=25856051 (Date of access: 09.06.2016). — Title from screen.
- Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:**
13. **Программа семантического кодирования изображений “TexSeg”** / В. Н. Кучуганов, А. В. Кучуганов, А. Н. Соловьева // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016612059. — 2016.