

На правах рукописи

**КОРНИЛОВ Федор Андреевич**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ  
СТРУКТУРНЫХ РАЗЛИЧИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

05.13.17 — теоретические основы информатики

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург — 2015

Работа выполнена в отделе прикладных проблем управления Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института математики и механики им. Н.Н.Красовского Уральского отделения Российской академии наук.

**Научный руководитель:** КОСТОУСОВ Виктор Борисович  
кандидат физико-математических наук, с.н.с.,  
заведующий отделом прикладных проблем управления,  
ФГБУН Институт математики и механики имени  
Н.Н. Красовского УрО РАН

**Официальные оппоненты:** ЧУЛИЧКОВ Алексей Иванович  
доктор физико-математических наук, профессор,  
физический факультет, отделение геофизики,  
кафедра компьютерных методов физики, ФГБОУ ВПО  
“Московский государственный университет имени  
М.В. Ломоносова”

ЛАБУНЕЦ Валерий Григорьевич  
доктор технических наук, профессор,  
действительный член Академии инженерных наук РФ,  
институт радиоэлектроники и информационных технологий,  
кафедра теоретических основ радиотехники, ФГБОУ ВПО  
“Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н.Ельцина”

**Ведущая организация:** ФГАОУ ВПО “Самарский государственный аэрокосмический  
университет имени академика С.П. КОРОЛЕВА  
(национальный исследовательский университет)”

Защита состоится 23 декабря 2015 года в 00:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.18 при ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета и на сайте: <http://susu.ac.ru/ru/dissertation/d-21229818/kornilov-fedor-andreevich>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

М.Л. Цымблер

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Задача поиска существенно изменившихся областей (структурных различий) на последовательности изображений является классической для анализа изображений и возникает в различных областях компьютерного зрения, таких как сжатие видеоданных, системы видеонаблюдения, дистанционное зондирование Земли и других<sup>1</sup>. Фундаментальное отличие между этими приложениями сводится к различному пониманию структуры изображения, среди многообразия подходов к пониманию которой следует выделить морфологический анализ изображений Ю.П. Пытьева<sup>2</sup>, развивающий методы, инвариантные относительно преобразований, характеризующих влияние условий регистрации изображений. Ю.В. Визильтером приведено обобщение морфологического подхода в задачах обработки изображений, основанное на построении и оптимизации априорных критериев (функционалов) проектирования, учитывающих особенности решаемой задачи<sup>3</sup>. Вне зависимости от специфики конкретной задачи, алгоритмы поиска структурных различий состоят из трех базовых шагов: предварительная обработка входных изображений (геометрическая и радиометрическая коррекция), собственно поиск различий и обработка полученных результатов (оценка площади и/или типа произошедших изменений). Методы непосредственно поиска различий можно разделить на алгебраические (например, вычитание изображений), трансформацию (уменьшение размерности данных, например, анализ главных компонент), классификацию (в частности, текстурную) и другие<sup>4</sup>. Наличие большого числа разноплановых алгоритмов порождает необходимость в методике их сравнения и исследования. Важную роль здесь играет оценка оптимальных параметров алгоритмов, например, порогового значения, оказывающего значительное влияние на результаты работы. При этом разработка и изучение алгоритмов должно проходить в рамках ограничений, налагаемых спецификой конкретной прикладной задачи, что делает математическую формализацию задачи, включающую в себя определение *структурного* (существенного) различия и его математическую модель, не менее актуальной темой для исследования.

В диссертации обсуждается класс алгоритмов, основанных на предварительном относительном яркостном выравнивании исходных изображений для устранения изменений, связанных со сменой условий их регистрации или наличием несущественных различий, и их последующего вычитания для обнаружения изменившихся областей. Такой подход обладает рядом преимуществ, в частности, гибкость и простота реализации, а также малое время работы. В качестве сферы применения методов рассмотрена одна из наиболее важных задач анализа цифровых космических снимков земной поверхности: поиск изменений на двух одновременных изображениях с целью выявления различий в составе объектов сцены на них. Решение данной задачи необходимо для своевременного обновления топографических карт и оперативного мониторинга земной поверхности, являющихся, с одной стороны, актуальными вследствие стремительного развития городской и транспортной инфраструктуры, вырубке лесов и других изменений природного или антропогенного характера, а с другой стороны — весьма трудоемких и решаемых в настоящее время в ручном или полуавтоматическом режиме человеком-оператором. Поэтому автоматизация данной задачи, основанная на дешифрировании аэрокосмических фотоснимков, является востребованной в различных геоинформационных системах (ГИС)<sup>5</sup>.

**Степень разработанности темы.** Задача поиска существенно изменившихся областей (*change detection*) на последовательности изображений вот уже много лет привлекает внимание исследователей по всему миру: Alves D. S., Bauer M. E., Brondizio E., Bruzzone L., Collins J. B., Congalton R. G., Coppin P. R., Franklin S. E., Fernandez Prieto D., Fung T., Jensen J. R., Huertas

<sup>1</sup>Radke R.J., Andra S., Al-Kofahi O., Roysam B. Image change detection algorithms: a systematic survey // IEEE Transactions on image processing, Mar. 2005. Vol. 14, № 3. P. 294–307.

<sup>2</sup>Пытьев Ю.П., Чулищев А.И. Методы морфологического анализа изображений. М.: ФизМатЛит, 2010. 336 с.

<sup>3</sup>Визильтер Ю.В. Обобщенная проективная морфология // Компьютерная оптика, 2008. Т. 32, № 4. С. 384–399.

<sup>4</sup>Lu D., Mausel P., Brondizio E., Moran E. Change detection techniques // International Journal of Remote Sensing, June 2004. Vol. 25, № 12. P. 2365–2401.

<sup>5</sup>Костюсов В.Б., Кандоба И.Н. Система автоматизированного дешифрирования космических снимков земной поверхности // Практика приборостроения, 2003. № 1. С. 45–50.

A., Lambin E. F., Moran E., Mausel P., Nelson R., Nevatia R., Serpico S., Townshend J. R. G., Tucker C. J., Woodcock C. E., а среди отечественных авторов — Ю. В. Визильтер, С. Ю. Желтов, Л. М. Местецкий, Ю. П. Пытьев, В. В. Сергеев, А. И. Чуличков. Причиной такой популярности является многообразие прикладных задач, для решения которых требуется знание о произошедших в изучаемой сцене изменениях: это задачи видеонаблюдения, видеокодирования, анализ движения, медицинские приложения и анализ космоснимков. Вследствие этого разработано и предложено необычайно широкое многообразие практических алгоритмов, позволяющих решать данную задачу. Одна из самых важных проблем при решении задачи поиска различий связана с определением того, что является этим самым различием, т. е. с необходимостью построения специальных математических моделей для существенно изменившихся областей. Поэтому поиск различий более правильно называть поиском *существенных* различий, и каждый алгоритм настраивается на специфику конкретных практических требований, иными словами — на то, что считать *структурой* изображения. Существует множество различных определений структуры изображений, среди которых можно выделить следующие три: морфологическая теория Серра, теория многомасштабного анализа и теория морфологического анализа Ю. П. Пытьева.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является исследование класса алгоритмов поиска структурных различий изображений, основанных на предварительном относительном яркостном выравнивании исходных изображений. Для ее достижения в диссертации решаются следующие задачи:

1. Разработка математической формализации задачи поиска структурных различий изображений, включающей математическую модель структурных различий и постановку задачи их обнаружения. Исследование распределения ошибок обнаружения и вычисление оптимальных параметров алгоритма поиска различий, построенного на основе морфологического проектора.

2. Создание новых прикладных алгоритмов поиска структурных различий.

3. Разработка методики и проведение вычислительного эксперимента для сравнения и исследования различных алгоритмов.

4. Построение на основе разработанных алгоритмов программного комплекса, решающего задачу оценки изменчивости территорий по данным дистанционного зондирования Земли.

**Научная новизна.** Научная новизна работы заключается в разработке автором формализации задачи поиска структурных различий изображений, включающей в себя определение структурного различия и его математическую модель. В рамках данной формализации впервые получена формула распределения вероятности яркостей пикселей изображения, представляющего собой разность исходного изображения и его морфологической проекции, а также формула для оптимального порога алгоритма поиска структурных различий, основанного на морфологическом проекторе. Предложена оригинальная формула обобщенной яркостной коррекции изображений, на основе которой разработан ряд новых прикладных алгоритмов, решающих поставленную задачу поиска структурных различий изображений. Для оценки оптимальных параметров алгоритмов и выбора наиболее подходящего для практического применения и разработки программного комплекса предложена модель и схема проведения вычислительного эксперимента.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** *Теоретическая ценность* работы состоит в том, что в ней приведена математическая формализация задачи поиска структурных различий изображений, развивающая теоретическую основу для данного класса задач обработки изображений и позволяющая получать строгие утверждения о работе и оптимальных параметрах алгоритмов поиска структурных различий. *Практическая ценность* работы заключается в выводе формулы оптимального порога алгоритма поиска структурных различий на основе морфологического проектора для разработанной в рамках формализации задачи математической модели. Предложенная формула обобщенной яркостной коррекции изображений позволяет строить новые алгоритмы, настроенные на решение конкретных прикладных задач в ГИС приложениях. Также предложена модель и схема вычислительного эксперимента для эмпирического исследования и сравнения различных алгоритмов поиска структурных различий. Кроме того, в рамках диссертации создан программный комплекс, решающий задачу поиска и анализа степени структурных различий изображений, который был интегрирован в среду визуализации и

обработки данных дистанционного зондирования Земли ENVI. Также была разработана версия программы, использующая высокопроизводительные многоядерные графические процессоры.

**Методология и методы исследования.** Используются методы теории вероятностей, математической статистики, математической морфологии, обработки изображений, математического моделирования.

**Степень достоверности результатов.** Математические утверждения, полученные в рамках диссертационного исследования, снабжены строгими доказательствами, что обеспечивает достоверность результатов. Теоретические положения подтверждены вычислительными экспериментами по сравнительному анализу предложенных методов.

**Апробация работы.** Основные результаты докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских научных конференциях:

— всероссийских и международных молодежных школах–конференциях “Проблемы теоретической и прикладной математики” (Екатеринбург, 2010 — 2013 гг.);

— научно-технической конференции–семинаре “Техническое зрение в системах управления мобильными объектами” (Таруса, 2010 г.);

— научно-технических конференциях “Техническое зрение в системах управления” (Москва, 2012, 2013 гг.);

— десятой международной конференции “Интеллектуализация обработки информации–2014” (о.Крит, Греция, 2014 г.).

Результаты работы внедрены в ПК “ДЕКОС” и модуль для поиска структурных различий на одновременных космических снимках земной поверхности, реализованный в ГИС ENVI (совместно с АО “НИИП центр Природа”).

**Публикации.** Результаты диссертации опубликованы в 13 научных работах [1–13], из них 2 в изданиях, входящих в список ВАК. В работе [2] автору принадлежит разработка структуры программного комплекса и реализация алгоритма поиска структурных различий, а его соавторам — формулировка технического задания и оформление документации. В работе [3] автору принадлежат основные результаты, а его соавтору — постановка задачи и аппарат структурных функций (стр. 39). В работе [5] автору принадлежит раздел 3 (стр. 306). В работах [6–8,11,12] автору принадлежат основные результаты, а его соавтору — постановка задачи.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав основного содержания, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем работы составляет 140 страниц машинописного текста; диссертация содержит 44 рисунков, 9 таблиц и 120 ссылок на литературные источники.

## Содержание работы

Во **введении** кратко обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цели, указаны научная новизна, практическое значение и апробация проведенных исследований.

В **первой главе**, “**Задача поиска структурных различий изображений**” приводится обзор существующих методов по данной тематике. Поиск существенно изменившихся областей (*change detection*) на последовательности изображений является весьма популярной задачей благодаря многообразию практических приложений, для решения которых требуется знание о произошедших в изучаемой сцене изменениях: это задачи видеонаблюдения (в которых поиск различий является предобработкой с целью уменьшить объем входных данных), видеокодирования, анализ движения, медицинские приложения и анализ космоснимков (мониторинг земной поверхности). Вследствие этого разработано и предложено большое количество практических алгоритмов, позволяющих решать данную задачу, и состоящих из следующих шагов:

1. Геометрическая и радиометрическая коррекция входных изображений.

2. Собственно поиск различий, результатом которого является полутоновое разностное изображение (*difference image*).

3. Пороговая обработка разностного изображения.

4. Оценка точности работы алгоритма.

В главе приводится описание различных алгоритмов, выполняющих данные операции, и определяется место предлагаемых в данной работе методов среди предшественников.

Во второй главе, “Модель структурных различий и задача их локализации” вводится формализация задачи поиска структурных различий изображений. Структура изображения — это некоторый способ описания информации о сцене, представленной на изображении. Разумеется, для данного изображения таких описаний может быть бесчисленное множество и выбор конкретного описания напрямую зависит от требований задачи. Структура изображения должна учитывать существенные изменения сцены и быть инвариантной к несущественным в контексте данной задачи изменениям. Помимо этого должен существовать способ сравнения структур изображений между собой с целью определения наличия *структурных различий* между ними. Существует множество различных определений структуры изображения, среди которых важное место занимает теория морфологического анализа Ю.П.Пытьева. В его основе лежит понятие *формы* изображения  $f$ , под которой понимается оператор проектирования  $P_f$  изображения  $g$ , действующий в евклидовом пространстве изображений<sup>6</sup>  $\Phi$ , на множество изображений, полученных из исходного путем применения всех возможных преобразований уровней яркости<sup>7</sup>:

$$P_f g(x) = \sum_i \frac{\sum_{x' \in X} g(x') \cdot \chi_i^f(x')}{\sum_{x' \in X} \chi_i^f(x')} \cdot \chi_i^f(x), \text{ где } \chi_i^f(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } f(x) = i, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (1)$$

Содержательно работа проектора заключается в усреднении яркостей второго изображения по уровням яркости первого. В данной работе именно уровни яркости будут рассматриваться как “носители” структуры изображения.

**Определение 2.2.** Структурой  $\Omega$  изображения  $f$  называется семейство  $\mathcal{L}_f = \{L_f(i)\}_i$  множеств уровня  $L_f(i) = \{x \in X \mid f(x) = i\}$  функции  $f$ .

Для устранения влияния условий регистрации в диссертации основное внимание уделяется относительной радиометрической (яркостной) коррекции исходных снимков. Функции, пригодные для яркостной коррекции изображений связаны с идеей сохранения структуры одного из изображений при изменении яркости его пикселей максимально близко к яркостям второго изображения. В применении к задаче поиска структурных различий это означает построение изображений  $f'$  и  $g'$ , которые были бы по структуре близки к  $f$  и  $g$ , а по яркости  $f'$  близко к  $g$ , а  $g'$  близко к  $f$ ; и дальнейшего вычисления различий уже для построенных изображений с  $g$  и  $f$  соответственно. В соответствии с этой схемой вводятся формулы обобщенной яркостной коррекции изображений:

$$\begin{aligned} f' &= \arg \min(\|h - g\|^2 + \omega(h; f) \mid h \in \Phi), \\ g' &= \arg \min(\|h - f\|^2 + \omega(h; g) \mid h \in \Phi), \end{aligned} \quad (2)$$

где под  $\omega$  понимается характеристическая функция, которая отражает тот факт, что изображение  $h$  получено путем изменения значений уровней яркости изображения  $f$  с сохранением его структуры. В работе рассматриваются алгоритмы, в основе которых лежат следующие характеристические функции структурной эквивалентности:

1. Характеристическая функция  $\omega_\pi$  :  $\omega_\pi(h; f) = 0$ , если существует некоторая функция преобразования яркости  $F : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  такая, что  $h(x) = F(f(x)) \forall x \in X$ , и иначе равна бесконечности.
2. Характеристическая функция  $\omega_1$  :  $\omega_1(h; f) = 0$ , если  $h(x) = kf(x) + b \forall x \in X$  и для некоторых вещественных  $k, b$ , и иначе равна бесконечности.
3. Характеристическая функция  $\omega_2$  :  $\omega_2(h; f) = 0$ , если  $h(x) = kf(x)^2 + bf(x) + c \forall x \in X$  и для некоторых вещественных  $k, b, c$ , и иначе равна бесконечности.

<sup>6</sup>Пытьев Ю.П., Чулчиков А.И. Методы морфологического анализа изображений. М.: ФизМатЛит, 2010. 336 с. Пункт 1.1.

<sup>7</sup>Пытьев Ю.П. Морфологический анализ изображений // Докл. АН СССР, 1983. Т. 269, № 5. С. 1061–1064.

4. Характеристическая функция  $\omega_m$ :

$$\omega_m(h; f) = \lambda \sum_{x \in X} \sum_{y \in N_x} G_f(h(x) - h(y), f(x) - f(y)),$$

$$G_f(i, j) = \begin{cases} \min(i^2, \alpha^2), & \text{если } |j| < \alpha, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где  $N_x$  — окрестность точки  $x$ ,  $\lambda$  и  $\alpha$  — положительные параметры. Здесь  $G$  — функция, которая штрафует пары пикселей в  $f'$ , разность яркостей которых больше разности яркостей этих же пикселей в  $f$ .

**Определение 2.3.** *Структурным различием* называется множество пикселей, удовлетворяющее следующему условию:

$$SD(f, g) = \{x \in X \mid |f'(x) - g(x)| > T \text{ или } |f(x) - g'(x)| > T\},$$

где  $f'$  и  $g'$  определены формулами (2),  $T$  — некоторое пороговое значение.

Необходимость построения второго изображения связана с тем, что операция яркостной коррекции несимметрична, т. е. ее применение позволяет найти лишь “появившиеся” изменения (объекты, отсутствующие на первом изображении, но присутствующие на втором). Нахождение “исчезнувших” объектов требует проведения симметризации яркостной коррекции. Приводится теорема, показывающая, что применение формулы (2) эквивалентно построению морфологической проекции Ю. П. Пытьева.

Также во второй главе формулируется математическая модель структурных различий. Пусть дана пара изображений  $f^0, g^0 \in \Phi$ . Первое изображение  $f^0$  (будем называть его фоном) содержит  $N_f$  уровней яркости. Значение яркости  $i$ -го уровня обозначим  $f_i^0$ , площадь уровня —  $S_i = |L_{f^0}(f_i^0)|$  ( $i \in [1, N_f]$ ). Изображение  $g^0$  строится путем добавления к  $i$ -ому уровню фона объекта, состоящего из  $N_g^i$  уровней яркости. Значение яркостей уровней разбиения  $j \in [0, N_g^i]$

обозначим  $g_{i,j}^0$ ,  $S_{i,j} = |L_{g^0}(g_{i,j}^0)|$ ,  $S_i = \sum_{j=0}^{N_g^i} S_{i,j}$  (индексы  $j$  от 1 до  $N_g^i$  соответствуют объекту, 0 —

фону). Таким образом,  $L_{f^0}(f_i^0) = \bigcup_{j=0}^{N_g^i} L_{g^0}(g_{i,j}^0)$ ,  $i \in [1, N_f]$ . Чтобы избежать краевых эффектов,

добавим условие, что площадь добавленного объекта меньше площади фона. Таким образом,

изображение  $g$  состоит из  $N_f + \sum_{i=1}^{N_f} N_g^i$  уровней яркости, где первое слагаемое соответствует количеству значений функции  $f^0$ , второе слагаемое соответствует добавленному объекту. Будем считать, что в данной точке есть структурное различие, если эта точка принадлежит объекту.

Для моделирования реальной ситуации в задаче поиска структурных различий к каждому изображению добавляем дискретный, стационарный и независимый в каждой точке аддитивный шум с известными параметрами: для первого изображения —  $n_\eta$ , для второго —  $n_\xi$ . Здесь  $n$  — означает случайное поле,  $\eta$  и  $\xi$  — плотности распределения случайных величин, возникающих при фиксировании аргумента  $n$ . В соответствии с условиями, налагаемыми на добавляемый шум, случайные поля  $n_\eta$  и  $n_\xi$  являются действительными, стационарными (однородными) и удовлетворяют условию эргодичности.

Обозначим  $f(\cdot) = f^0(\cdot) + n_\eta(\cdot)$  и  $g(\cdot) = g^0(\cdot) + n_\xi(\cdot)$ . Таким образом, в качестве модели структурного различия используется дискретный (по аргументу и по значению) случайный процесс, который представляет собой сумму неслучайной функции-изображения и независимого дискретного случайного процесса с законом распределения в каждой точке, заданным таблицей:

$$f = \{f(x_i)\}_{i=1}^S = \{f^0(x_i) + n_\eta\}_{i=1}^S, \quad (3)$$

$$g = \{g(x_i)\}_{i=1}^S = \{g^0(x_i) + n_\xi\}_{i=1}^S.$$

Случайные поля  $f$  и  $g$  являются действительными, но, в общем случае, условиям однородности и эргодичности не удовлетворяют, т.к. по причине наличия неслучайной и различной в точках каждого уровня яркости добавки (исходные уровни  $f^0$  и  $g^0$ ) их мат.ожидания уже не будут константами. Тем не менее, их можно интерпретировать как модели случайных изображений, к которым будем применять алгоритм поиска структурных различий на основе морфологического проектора Пытьева.

Поскольку изображения  $f$  и  $g$  — случайные поля, то значение разностного изображения  $R(x_c)$  в произвольной зафиксированной точке  $x_c \in X$  также является величиной случайной, и главной задачей будет построение способа ее вычисления. Однако значения случайной величины  $R(x_c)$  существенно зависит от того, есть структурное различие в точке  $x_c$  или его нет, поэтому необходимо рассматривать соответствующую пару условных распределений.

У с л о в и е 1: точка  $x_c$  принадлежит объекту, т.е. в ней есть структурное различие.

У с л о в и е 2: точка  $x_c$  принадлежит фону, т.е. структурного различия нет.

Распределение вероятности  $r(R(x_c) = i \mid x_c \text{ принадлежит объекту})$  обозначим  $r^+(i)$ . Второе распределение  $r(R(x_c) = i \mid x_c \text{ принадлежит фону})$  обозначим  $r^-(i)$ .

З а д а ч а 1. Получить условные распределения вероятностей  $r^+(R)$  и  $r^-(R)$  величины  $R(x_c)$  для модельной задачи.

Основная часть второй главы посвящена решению модельной задачи 1 для алгоритма, основанного на морфологическом проекторе, которое основывается на следующем факте: поскольку алгоритм поиска структурных различий оценивает только одну зафиксированную точку  $x_c \in X$ , то при использовании морфологического проектора важно только множество  $L_f(f(x_c))$ , которому эта точка принадлежит. Пусть  $k = |L_f(f(x_c))|$ . Очевидно, что  $k \in [1, S]$ . Введем обозначения:  $L_f^{i,j}(f(x_c)) = \{x \in L_f(f(x_c)) \mid f^0(x) = f_i^0 \text{ и } g^0(x) = g_{i,j}^0\}$ ; под  $B(n, m, p)$  будем понимать биномиальное распределение вероятностей: вероятность появления события ровно  $n$  раз в серии из  $m$  испытаний при условии, что в единичном испытании вероятность его появления равна  $p$ ; конфигурация  $a = (a_{1,0}, a_{1,1}, \dots, a_{1,N_g^1}, \dots, a_{N_f,0}, a_{N_f,1}, \dots, a_{N_f,N_g^{N_f}})$ , где  $a_{q,j}$  соответствует мощности пересечения множества  $L_f(f(x_c))$  и уровня яркости объекта с номером  $j$ , полученного из разбиения уровня фона с номером  $q$  (индекс 0 соответствует фону на втором изображении). Из-за разницы яркостей незашумленного изображения  $f^0$  в точках разных уровней после добавления шума распределения вероятностей яркостей в этих уровнях также будут различными, поэтому далее будем обозначать  $p_q(f = i) = p(f(x) = i \mid f^0(x) = f_q^0)$  — вероятность появления яркости  $i$  в точке, которая на изображении  $f^0$  принадлежит уровню яркости с номером  $q$ . Справедлива следующая теорема.

**Теорема 2.2.** Пусть дано случайное поле  $f$ , заданное по формуле (3).

1. В задаче 1 при выполнении условий 1 и  $x_c \in L_f^{n,m}(f(x_c))$  ( $n \in [1, N_f]$  и  $m \in [1, N_g^n]$ ) вероятность появления реализации поля  $f$  такой, что  $|L_f(f(x_c))| = k$ ,  $|L_f^{n,m}(f(x_c))| = a_{n,m} + 1$  и  $|L_f^{q,j}(f(x_c))| = a_{q,j}$  для  $(q, j): q \in [1, N_f], j \in [0, N_g^q], (q, j) \neq (n, m)$ , равна

$$p_{k,a}^{n,m} = \sum_i \left( p_n(f = i) \cdot \prod_{q=1}^{n-1} \prod_{j=0}^{N_g^q} B(a_{q,j}, S_{q,j}, p_q(f = i)) \right. \\ \times \prod_{j=0}^{m-1} B(a_{n,j}, S_{n,j}, p_n(f = i)) \cdot B(a_{n,m}, S_{n,m} - 1, p_n(f = i)) \cdot \\ \left. \times \prod_{j=m+1}^{N_g^n} B(a_{n,j}, S_{n,j}, p_n(f = i)) \cdot \prod_{q=n+1}^{N_f} \prod_{j=0}^{N_g^q} B(a_{q,j}, S_{q,j}, p_q(f = i)) \right),$$



где

$$\left. \begin{aligned} \sum_{q=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_g^q} a_{q,j} &= k - 1, \\ 0 \leq a_{q,j} &\leq S_{q,j} \quad \forall (q,j): q \in [1, N_f], j \in [0, N_g^q], \quad (q,j) \neq (n,m), \\ 0 \leq a_{n,m} &\leq S_{n,m} - 1. \end{aligned} \right\}$$

2. В задаче 1 при выполнении условий 2 и  $x_c \in L_f^{n,0}(f(x_c))$  ( $n \in [1, N_f]$ ) вероятность появления реализации поля  $f$  такой, что  $|L_f(f(x_c))| = k$ ,  $|L_f^{n,0}(f(x_c))| = a_{n,0} + 1$  и  $|L_f^{q,j}(f(x_c))| = a_{q,j}$  для  $(q,j): q \in [1, N_f], j \in [0, N_g^q], (q,j) \neq (n,0)$ , равна

$$\begin{aligned} p_{k,a}^{n,0} &= \sum_i \left( p_n(f = i) \cdot \prod_{q=1}^{n-1} \prod_{j=0}^{N_g^q} B(a_{q,j}, S_{q,j}, p_q(f = i)) \right. \\ &\quad \times B(a_{n,0}, S_{n,0} - 1, p_n(f = i)) \cdot \prod_{j=1}^{N_g^n} B(a_{n,j}, S_{n,j}, p_n(f = i)) \cdot \\ &\quad \left. \times \prod_{q=n+1}^{N_f} \prod_{j=0}^{N_g^q} B(a_{q,j}, S_{q,j}, p_q(f = i)) \right) \end{aligned}$$

где

$$\left. \begin{aligned} \sum_{q=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_g^q} a_{q,j} &= k - 1, \\ 0 \leq a_{n,0} &\leq S_{n,0} - 1, \\ 0 \leq a_{q,j} &\leq S_{q,j}, \quad \forall (q,j): q \in [1, N_f], j \in [0, N_g^q], \quad (q,j) \neq (n,0). \end{aligned} \right\}$$

Таким образом, пространство всех изображений разбивается на классы в зависимости от параметров  $(k, a)$  путем перебора всех возможных вариантов реализации поля (изображения)  $f$ , а теорема 2.2 позволяет определить вероятности для классов из этого разбиения. Формулируется основная теорема.

**Теорема 2.3.** 1. В задаче 1 при условии 1 распределение вероятностей случайной величины  $R(x_c)$  имеет вид

$$r^+(i) = \frac{\sum_{n=1}^{N_f} \sum_{m=1}^{N_g^n} (S_{n,m} \cdot r_{n,m}(i))}{\sum_{u=1}^{N_f} \sum_{v=1}^{N_g^u} S_{u,v}},$$

где

$$r_{n,m}(i) = \sum_{k,a} (p_{k,a}^{n,m} \cdot p(|G_{k,a}^{n,m} + E_k| = i)),$$

величина  $p_{k,a}^{n,m}$  определяется теоремой 2.2,

$$G_{k,a}^{n,m} = \frac{1}{k} \left( \sum_{q=1}^{N_f} \sum_{j=0}^{N_g^q} (a_{q,j} \cdot g_{q,j}^0) + (1 - k) g_{n,m}^0 \right), \quad E_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k-1} \varepsilon_j + \frac{1 - k}{k} \varepsilon_c,$$

$\varepsilon_j$  — распределение вероятностей случайной величины  $g(x_j)$ , соответствующей точке  $x_j \in L_f(f(x_c))$ ,  $\varepsilon_c$  — распределение вероятностей случайной величины  $g(x_c)$ .

2. В задаче 1 при условии 2 распределение вероятностей случайной величины  $R(x_c)$  имеет вид

$$r^-(i) = \frac{\sum_{n=1}^{N_f} (S_{n,0} \cdot r_{n,0}(i))}{\sum_{u=1}^{N_f} S_{u,0}},$$

где

$$r_{n,0}(i) = \sum_{k,a} (p_{k,a}^{n,0} \cdot p(|G_{k,a}^{n,0} + E_k| = i)),$$

величина  $p_{k,a}^{n,0}$  определяется теоремой 2.2,

$$G_{k,a}^{n,0} = \frac{1}{k} \left( \sum_{q=1}^{N_f} \sum_{j=0}^{N_g^q} (a_{q,j} \cdot g_{q,j}^0) + (1-k) g_{n,0}^0 \right),$$

определения  $E_k$ ,  $\varepsilon_j$  и  $\varepsilon_c$  такие же, как в п. 1.

Опираясь на теорему 2.3 определен способ вычисления оптимального порога алгоритма. В качестве критерия оптимальности используется минимум суммы ошибок первого и второго рода (*percentage correct classification*). Имеет место следующая теорема.

**Теорема 2.4.** В условиях задачи 1 порог алгоритма поиска структурных различий на основе морфологического проектора, вычисленный по следующей формуле,

$$T_{opt} = \arg \min_T \left( \sum_{i < T} r^+(i) + \sum_{i > T} r^-(i) \right)$$

является оптимальным в смысле критерия *percentage correct classification*.

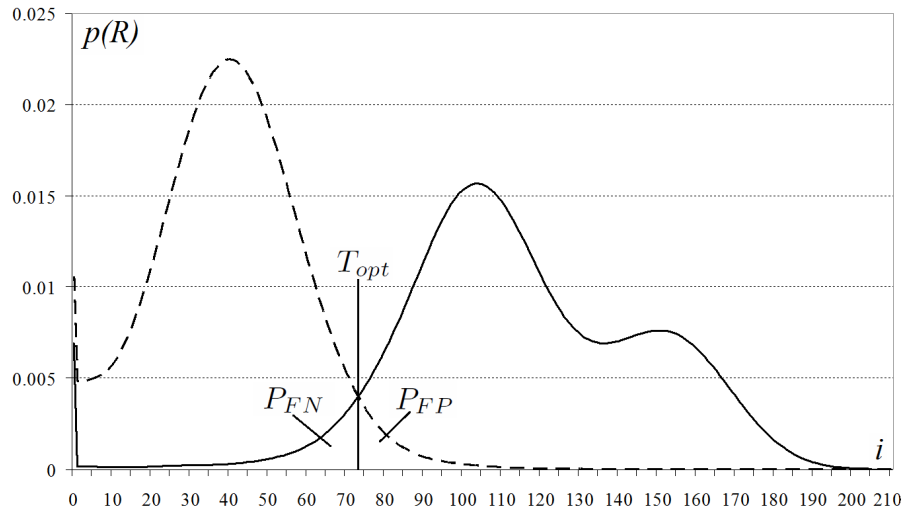


Рис. 1. Графики распределений  $r^+(i)$  (сплошная линия) и  $r^-(i)$  (пунктирная линия) для изображений с параметрами  $S = 441$ ,  $S_1 = 40$ ,  $S_2 = 60$ ,  $S_3 = 20$ ,  $g_1^0 = 255$ ,  $g_2^0 = 204$ ,  $g_3^0 = 153$ ,  $g_0^0 = 56$  (добавление трехуровневого объекта). Оптимальный порог  $T_{opt} = 73$ . Оценки ошибок:  $P_{FN} = 0.056$ ,  $P_{FP} = 0.038$ .

Результаты численного эксперимента по применению теоремы 2.4 приведены на рис. 1 для случая объекта, состоящего из трех уровней яркости, графики распределений вероятностей  $r^+(i)$  и  $r^-(i)$ , полученных с помощью теоремы 2.3. Оба изображения содержат дискретный шум, распределение которого аппроксимируется нормальным распределением с параметрами  $N(0, 10)$ .

В третьей главе, “Алгоритмы поиска структурных различий и их реализация” приводится описание разработанных алгоритмов поиска структурных различий. Их общая схема такова:

1. Исходные изображения сканируются с шагом 1 локальным окном заданного размера  $d \times d$ . Центральную точку этого окна будем обозначать  $x_c$ . В случае необходимости производится геометрическое выравнивание фрагментов.

2. Для каждого положения окна по двум фрагментам сравниваемых изображений  $f$  и  $g$  строятся две функции преобразования яркости  $F_{fg}$  и  $F_{gf}$ . Необходимость использования схемы с двумя функциями связана с несимметричностью функций преобразования яркости и позволяет добиться симметризации результата, т. е. становится неважным, сравнивается первое изображение со вторым или наоборот.

3. С помощью функций  $F_{fg}$  и  $F_{gf}$  строятся преобразованные изображения  $f' = F_{fg}(f)$  и  $g' = F_{gf}(g)$ , при этом яркость изображения  $f'$  “выровнена” по яркости изображения  $g$  с сохранением структуры изображения  $f$ , и аналогично — для изображения  $g'$ .

4. Строятся разностные изображения  $R_{fg}(x) = |f'(x) - g(x)|$  и  $R_{gf}(x) = |g'(x) - f(x)|$ . Для этих изображений яркость точки характеризует величину структурного несоответствия исходных изображений, т. е. чем ярче точка, тем вероятнее, что в ней присутствует структурное различие.

5. Для завершения симметризации строится результирующее разностное изображение  $R$ , яркость каждой точки которого есть максимум яркостей точек разностных изображений с соответствующими координатами:  $R(x) = \max(R_{fg}(x), R_{gf}(x))$ .

6. Производится пороговая обработка изображения  $R$ . Здесь оценивается яркость центральной точки: при выполнении  $R(x_c) \geq T$  ( $T$  — параметр порога) в данной точке присутствует структурное различие, и в соответствующую точку результирующего выходного изображения  $\mathbf{R}(x_c)$  записывается значение 1, если нет, то 0. Таким образом, обработка каждого сканирующего окна дает на результирующем изображении одну точку, яркость которой 1 или 0. Далее из этих точек формируются связные области структурных различий — конечный результат. В целях борьбы со случайными выбросами можно фильтровать найденные области, отбрасывая те, площадь которых незначительна.

Функция преобразования яркости — это попиксельно действующий оператор относительной радиометрической коррекции исходных изображений, который строится для каждого положения сканирующего окна на основе наборов яркостей изображений в нем, и применяется для “выравнивания” яркостей фрагментов с сохранением их структуры. Такой подход позволяет игнорировать не считающиеся структурными различиями объекты, изменившие свой цвет, но сохранившие форму. В качестве таких функций в данной работе используются:

1. морфологический проектор (1);
2. регуляризованный вариант морфологического проектора:

$$P_{fg}(x) = \frac{\sum_i \tilde{f}_i(x)}{\sum_j \tilde{\chi}_i^f(x)} = \sum_i \left( \frac{\sum_{x' \in X} g(x') \cdot \tilde{\chi}_i^f(x')}{\sum_{x' \in X} \tilde{\chi}_i^f(x')} \cdot \frac{\tilde{\chi}_i^f(x)}{\sum_j \tilde{\chi}_i^f(x)} \right), \quad (4)$$

где  $\tilde{\chi}_i^f$  вычисляется по формуле

$$\tilde{\chi}_i^f(x) = \exp\left(-\frac{(f(x) - i)^2}{\sigma_c^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{(x - x_c)^2}{\sigma_d^2}\right);$$

3. линейная функция преобразования яркости:

$$f'(x) = k \cdot f(x) + b, \quad (5)$$

где коэффициенты  $k$  и  $b$  находятся с помощью метода наименьших квадратов

$$\sum_{x \in X} (g(x) - (k \cdot f(x) + b))^2 \rightarrow \min_{k, b};$$

4. квадратичная функция преобразования яркости:

$$f'(x) = k \cdot f^2(x) + b \cdot f(x) + c, \quad (6)$$

где коэффициенты  $k$ ,  $b$  и  $c$  находятся с помощью метода наименьших квадратов

$$\sum_{x \in X} (g(x) - (k \cdot f^2(x) + b \cdot f(x) + c))^2 \rightarrow \min_{k, b, c}.$$

В основе алгоритма поиска структурных различий с непрерывной структурной характеристической функцией  $\omega_m$  лежит, как и в предыдущих случаях, яркостная коррекция входных снимков, заключающаяся в приведении набора яркостей первого изображения к яркости второго с сохранением структуры первого изображения. Для улучшения результата также производится приведение каждого изображения к самому себе, что позволяет избавиться от присутствующего шума. Реализация такого алгоритма сводится к задаче глобальной минимизации функционалов (2), что эквивалентно минимизации следующей энергетической функции:

$$\begin{aligned}
 E(f'; f, g) &= \|f'(x) - g(x)\|^2 + \omega_m(f'; f) = \\
 &= \sum_{x \in X} (f'(x) - g(x))^2 + \lambda \sum_{x \in X} \sum_{y \in N_x} G_f(f'(x) - f'(y), f(x) - f(y)), \quad (7) \\
 G_f(i, j) &= \begin{cases} \min(i^2, \alpha^2), & \text{если } |j| < \alpha, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}
 \end{aligned}$$

где  $N_x$  — окрестность точки  $x$ ,  $\lambda$  и  $\alpha$  — положительные параметры. Параметр  $\lambda$  отвечает за близость приведения изображения  $f$  к  $g$ : чем он больше, тем больше алгоритм будет стремиться сохранить структуру изображения  $f$ , из-за чего яркостное приведение  $f$  к  $g$  будет менее точным. Если же  $\lambda \rightarrow 0$ , то структура изображения  $f$  будет разрушаться для наиболее полного совпадения яркостей  $f$  и  $g$  (очевидно, что если  $\lambda = 0$ , то  $f' = g$ ). Параметр  $\alpha$  характеризует структуру изображения  $f$ , задавая допустимый перепад яркости между различными линиями уровня: если яркости двух точек отличаются меньше, чем на  $\alpha$ , то они принадлежат одному уровню. Для нахождения минимума функции  $E(f'; f, g)$  будет использоваться аппарат марковских случайных полей (МСП)<sup>8</sup>. Одним из наиболее простых в реализации методов приближенного решения подобной задачи является алгоритм Метрополиса<sup>9</sup>. В качестве энергетической функции для данного метода будем использовать введенную функцию  $E(f'; f, g)$  (7).

В заключительной части главы приводятся асимптотическая оценка времени работы алгоритмов, и описание программного комплекса, решающего задачу поиска структурных различий и состоящего из двух блоков:

1. Программный модуль, интегрированный в ГИС ENVI, и разработанный с помощью встроенного в ENVI языка программирования IDL;
2. Модуль поиска структурных различий, представляющий собой динамически подключаемую библиотеку, написанную на MS Visual C++ 2008 Express Edition.

Программный модуль отвечает за загрузку и сохранение изображений, а также за визуализацию результата. Входными данными для алгоритма являются спутниковые снимки — как правило, большого размера и требующие некоторой специальной предварительной обработки типа координатной привязки углов, что удобнее всего делать в разработанных для этих целей ГИС, среди которых была выбрана ГИС ENVI. Основная вычислительная часть — поиск структурных различий и обработка результирующего изображения — была сделана в виде динамически подключаемой библиотеки, которая содержит две части: собственно поиск различий и блок перевода контуров в текстовый формат. Поиск различий осуществляется с помощью алгоритма, основанного на регуляризованном морфологическом проекторе. Полученное результирующее разностное изображение возвращается ENVI для его пороговой обработки и построения контуров вокруг найденных областей. Эти контуры накладываются на исходные снимки, ограничивая найденные области структурных различий. Результаты работы программного комплекса можно сохранить в следующих видах:

- как изображения, представляющие собой входные снимки с наложенными на них контурами, ограничивающими найденные области структурных различий;
- как log-файл, содержащий таблицу площадей структурных различий для всего изображения и каждого номенклатурного листа<sup>10</sup> по отдельности;

<sup>8</sup>Li S.Z. *Markov Random Field Modeling in Image Analysis*, 3rd ed. Springer Berlin. Heidelberg, 2009. 362 с.

<sup>9</sup>Винклер Г. Анализ изображений, случайные поля и динамические методы Монте-Карло. Математические основы. Новосибирск, Издательство СО РАН, филиал "Гео", 2002. 343 с.

<sup>10</sup>Поклад Г.Г. Геодезия. Москва: "Недра", 1988. 304 с.

— как текстовые файлы в формате .mif / .mid<sup>11</sup>, содержащие найденные контуры.

Также в третьей главе сравнивается время работы и обсуждается применение технологии CUDA при реализации алгоритмов поиска структурных различий.

**Четвертая глава, “Исследование алгоритмов поиска структурных различий”** состоит из двух частей: эмпирического исследования каждого алгоритма по отдельности и сравнения результатов их работы. Эмпирическое исследование проводится для того, чтобы среди всех возможных значений параметров алгоритмов выбрать те, при которых они показывают наилучшее качество работы в зависимости от уровня шума, присутствующего на изображениях. Ключевое место среди этих параметров занимает оптимальный порог, однако оценка требуется и для всех остальных, например, для размера сканирующего окна. Подходящим критерием качества работы является анализ ROC-кривых<sup>12</sup>, количественную интерпретацию которых дает показатель площади под ней (AUC).

Для корректного проведения численного эксперимента предлагается еще одна вероятностная модель структурных различий, представляющая собой усложнение “фона” исходных изображений и добавляемых “объектов” для модели из первой главы, в качестве которых теперь будут рассматриваться не уровни яркости, а фрагменты спутниковых снимков. Для этого выбирается космический снимок некоторого участка земной поверхности, который разделяется на две части: первый фрагмент и его копия становятся исходными изображениями, второй фрагмент будет донором для генерации структурных различий. Поскольку исходные изображения изначально идентичны, то одинаковы и присутствующие на них уровни яркости, вызванные влиянием шума. Таким образом, эти уровни яркости становятся в некотором смысле “содержательными”, т. е. определяют “фон” на обоих изображениях.

Структурными различиями становятся объекты, вырезанные из второго фрагмента снимка и добавленные к исходным изображениям. При этом добавление объекта ко второму изображению эквивалентно его появлению; добавление к первому изображению — исчезновению объекта; добавление двух разных объектов к одной и той же области обоих снимков — изменению формы. Типы переносимых объектов определяются требованиями задачи. После этого к изображениям добавляется шум с известными параметрами. Такой подход позволяет получить изображения с идеальной (освобожденной от влияния оператора) ручной разметкой, для которых возможно варьировать уровень шума и тип объектов интереса.

Ввиду значительной вычислительной сложности, численный эксперимент проводится с использованием технологии CUDA<sup>13</sup> и суперкомпьютера “Уран” ИММ УрО РАН<sup>14</sup>. Схемы серий испытаний для различных алгоритмов отличаются только набором исследуемых параметров, и состоят из следующих шагов:

1. По спутниковому снимку создается пара “идеальных” изображений с различиями требуемых типов и масштаба, а также их разметка.

2. К построенным изображениям добавляется шум с известными параметрами и применяется алгоритм поиска структурных различий с определенными параметрами функции преобразования яркости.

3. Шаг 2 повторяется несколько раз, и результаты усредняются. Перебирая все возможные параметры алгоритма, определяются их оптимальные значения (кроме порога).

4. Для контроля наилучшего алгоритма, полученного по результатам п.3, берется пара разновременных геометрически выровненных спутниковых снимков, строится их ручная разметка, применяется алгоритм и определяются вероятности верного обнаружения и ложной тревоги, а также площади под ROC-кривыми.

Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Также в ходе эксперимента были получены зависимости  $AUC(\sigma, d)$  и  $T_{opt}(\sigma, d)$  (где  $\sigma$  — стан-

<sup>11</sup>Формат обмена данными MapInfo: <http://mapinfo.forum.hut2.ru/>

<sup>12</sup>Green D.M., Swets J.M. Signal detection theory and psychophysics. New York: John Wiley and Sons Inc., 1966.

<sup>13</sup>Боресков А.В. и др. Параллельные вычисления на GPU. Архитектурная и программная модель CUDA. Серия “Суперкомпьютерное образование”. М.: Издательство Московского университета, 2012. 336 с.

<sup>14</sup>Суперкомпьютерный центр “Уран” ИММ УрО РАН: <http://parallel.uran.ru/>

Оптимальные параметры алгоритмов поиска структурных различий изображений, вероятности верного обнаружения и ложной тревоги, а также площади под ROC-кривыми

Алгоритм	$d$	Другие параметры	$T_{opt}$	ТР	ФР	AUC
Рег. морфологический проектор	23	$\sigma_c = 2$	20	73.1%	2.1%	0.897085
Квадратичная функция	23	–	22	68.7%	5.9%	0.896573
Морфологический проектор	23	–	21	66.9%	6.3%	0.895371
Линейная функция	25	–	22	63.3%	4.3%	0.892668
Глобальная оптимизация	15	$\lambda = 1816, \alpha = 5$	22	63.5%	10.6%	0.874071

дартное отклонение шума в модели,  $d$  — размер сканирующего окна алгоритма), графики зависимости площади под ROC-кривой AUC от величины стандартного отклонения шума  $\sigma$  при различных значениях параметра  $d$  и максимальное значение AUC для каждого значения  $\sigma$  по всем параметрам алгоритмов, т. е. наилучшее качество работы алгоритма при заданном уровне шума (рис. 2). На основе всех полученных результатов сделан вывод, что наилучшее качество работы показал алгоритм, основанный на регуляризованном морфологическом проекторе, и его следует использовать для решения исходной прикладной задачи: поиск и оценка площади структурных различий для разновременных космических снимков земной поверхности.

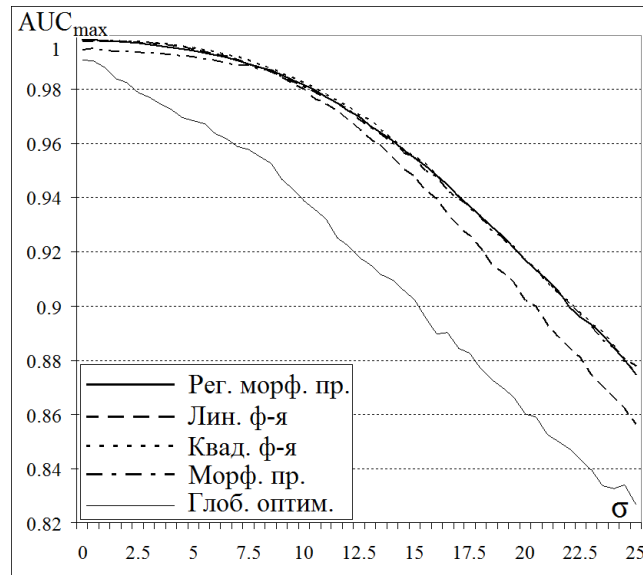


Рис. 2. Графики зависимости максимальной по всем параметрам величины площади под ROC-кривой AUC от величины стандартного отклонения шума  $\sigma$  для алгоритмов поиска структурных различий изображений.

В завершении главы приводится исследование влияния рассинхронизации изображений на разработанные алгоритмы поиска структурных различий изображений.

В **заключении** подведены основные итоги работы, выносимые на защиту, а также приводятся данные о публикациях и апробациях автора по теме диссертации и обсуждаются некоторые перспективные направления дальнейших исследований.

### Основные результаты диссертационной работы

Диссертация посвящена исследованию класса алгоритмов поиска структурных различий изображений, основанных на предварительном относительном яркостном выравнивании исходных изображений для устранения несущественных изменений, и их применению к поиску появившихся или исчезнувших объектов на полутоновых разновременных космических снимках земной

поверхности. На защиту выносятся следующие новые научные результаты.

1. На основе понятия структуры изображения как набора множеств уровней яркости введена вероятностная модель структурных различий пары изображений и сформулирована задача поиска структурных различий. Для этой модели получена конструктивная формула распределения вероятности яркости точек разностного изображения, представляющего собой разность исходного изображения и его морфологической проекции. С помощью этой формулы построен оптимальный порог исследуемого алгоритма.
2. Разработан ряд новых прикладных алгоритмов, решающих задачу поиска структурных различий изображений, использующих как сканирующее окно, так и глобальную оптимизацию энергетической функции. Также разработан алгоритм, основанный на непосредственном применении введенного определения структурных различий, полезный как для поиска малоразмерных структурных различий, так и для устранения локальной рассинхронизации изображений.
3. Предложена методика численного эксперимента для сравнения качества работы алгоритмов поиска структурных различий изображений. Эта методика построена на базе параллельных суперкомпьютерных технологий и, в частности, ее программная реализация использует высокопроизводительные многоядерные графические процессоры. С помощью данной методики проведен объемный вычислительный эксперимент, результаты которого позволили оценить оптимальные параметры новых и существующих алгоритмов.
4. Созданный на базе проведенного исследования программный комплекс, решающий задачу оперативной оценки изменчивости топографических объектов местности по разновременным космическим снимкам. Данный комплекс был интегрирован в среду визуализации и обработки данных дистанционного зондирования Земли ENVИ и внедрен в практику научно-исследовательского и производственного центра АО “НИИП центр Природа”, (г. Москва).

#### Публикации по теме диссертации

##### - Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. *Корнилов Ф.А.* Исследование алгоритма поиска структурных различий изображений // Труды Института математики и механики УрО РАН. Екатеринбург: ИММ УрО РАН, 2013. Т. 19, № 1. С. 144–159.
2. *Бровко Е.А., Кандоба И.Н., Корнилов Ф.А., Перевалов Д.С.* Оперативный мониторинг структурных изменений изображений объектов на космических снимках земной поверхности // Программные продукты и системы, 2015. № 1 (109). С. 79–86.

##### - Публикации в других изданиях:

3. *Корнилов Ф.А., Перевалов Д.С.* Задача обнаружения структурных различий изображений // Алгоритмы и програм. средства параллел. вычислений. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. Вып. 11. С. 37–56.
4. *Корнилов Ф.А.* Поиск структурных различий изображений: алгоритмы и методика исследования // Машинное обучение и анализ данных, 2014. Т. 1. № 7. С.902–919.
5. *Корнилов Ф.А., Костоусов В.Б., Перевалов Д.С.* Быстрые алгоритмы анализа изображений со структурными искажениями // Труды научно-технической конференции-семинара “Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2010”. М.: КДУ, 2011. С. 303–309.

6. *Корнилов Ф.А., Перевалов Д.С.* О применении регуляризации морфологического проектора в задаче поиска структурных различий // Сборник трудов научно-технической конференции “Техническое зрение в системах управления 2012”. Москва, 2012. С. 265–271.
7. *Корнилов Ф.А., Перевалов Д.С.* Обнаружение изменений объектов земной поверхности по спутниковым снимкам // Проблемы теоретической и прикладной математики. Тезисы 41-й Всероссийской молодежной конференции. Екатеринбург: ИММ УрО РАН, 2010. С. 534–540.
8. *Корнилов Ф.А., Перевалов Д.С.* Оценка оптимального порога для алгоритма поиска структурных изменений с помощью проектора Пытьева // Современные проблемы математики. Тезисы 42-й Всероссийской молодежной школы-конференции. Екатеринбург: ИММ УрО РАН, 2011. С. 291–293.
9. *Корнилов Ф.А.* Алгоритм поиска структурных различий на основе Марковских случайных полей // Современные проблемы математики. Тезисы Международной (43-й Всероссийской) молодежной школы-конференции. Екатеринбург: ИММ УрО РАН, 2012. С. 311–313.
10. *Корнилов Ф.А.* Теоретическое исследование морфологического проектора Пытьева // Современные проблемы математики. Тезисы Международной (44-й Всероссийской) молодежной школы-конференции. Екатеринбург: ИММ УрО РАН, 2013. С. 322–325.
11. *Корнилов Ф.А., Перевалов Д.С.* Алгоритм поиска структурных изменений на изображениях // СПИСОК-2009: материалы межвузовской научной конференции по проблемам информатики. Екатеринбург: Издательство Урал. ун-та, 2009. С. 264–266.
12. *Корнилов Ф.А., Перевалов Д.С.* Алгоритмы обнаружения структурных изменений на разновременных снимках // Тез. и аннот. докл. рег. науч.-тех. конф. “Данные дистанционного зондирования Земли для решения практических задач развития территорий”. Екатеринбург: ФГУП “Уралгеоинформ”, 2009. С. 21–22.
13. *Корнилов Ф.А.* Поиск структурных различий изображений // Интеллектуализация обработки информации: 10-я международная конференция. Греция, о. Крит, 6–10 октября 2014 г.: Тезисы докладов. — М.: Торус Пресс, 2014. С.118–119.

Исследования, проведенные в диссертации, были поддержаны программами фундаментальных исследований Президиума РАН при финансовой поддержке УрО РАН “Динамические системы и теория управления” (проект 12-П-1-1022) и “Информационные, управляющие и интеллектуальные технологии и системы” (проект 12-П-1-1023).

Подписано в печать 00.00.2015 г. Формат 60x84/16  
Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100. Заказ № 000

Копировальный центр “Копи-А”  
620027, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 71