

На правах рукописи



КОВАЛЕВ Юрий Анатольевич

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МАСШТАБНЫХ И ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации (технические системы)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Муром, 2021

Работа выполнена на кафедре «Информационные системы» Муромского института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Научный
руководитель:

Андрианов Дмитрий Евгеньевич

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационные системы», заместитель директора по учебной работе, Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром

Официальные
оппоненты:

Немтинов Владимир Алексеевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерно-интегрируемые системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Макаренков Александр Алексеевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», г. Рязань

Ведущая
организация:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Защита состоится «06» октября 2021 года в «14:00» на заседании диссертационного совета 24.2.375.01 (Д 212.211.01) в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу:
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д.59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ» и на сайте: <http://rsreu.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.375.01 (Д 212.211.01)
доктор технических наук, доцент



**Прутков Александр
Викторович**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные информационные системы обработки и анализа данных предоставляют пользователям широкий набор всевозможных операций с данными в различных сферах деятельности человека. И все более широкое применение получают системы, в основу которых заложена картографическая привязка объектов анализа, – геоинформационные системы (ГИС).

Совершенствование ГИС-технологий в настоящее время направлено на использование спутниковых снимков местности, данных с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также на анализ метаданных об объектах (многомасштабный и временной анализ). Интеграция в ГИС дополнительных характеристик, таких как третье измерение, время или масштаб, до сих пор достигалась путем специальных адаптаций к 2D структурам. При этом в современных ГИС (MapInfo, ArcGIS, Панорама и др.) недостаточно полно проработан вопрос анализа пространственных характеристик объектов – топологических признаков. Здесь в основу обработки закладывается подход с использованием координат объектов, что значительно увеличивает вычислительную сложность алгоритмов анализа.

Отсюда возникает необходимость перехода к обработке данных в пространственной области, анализ топологических характеристик объектов, обработка данных об объектах за различные временные интервалы и при масштабировании. Реализация такого подхода необходима при решении задач обработки и анализа данных, имеющих картографическую привязку, во многих организациях и структурах для идентификации и классификации пространственно-распределённых объектов.

Для решения данных задач предлагается взять за основу методы персистентной гомологии, которые учитывают топологические свойства набора точек. Персистентная гомология – это множество гомологических классов (топологические особенности первого и второго порядка) для фильтрации, причем создание класса происходит в симплициальном комплексе. Симплициальный комплекс – топологическое пространство, представленное как объединение множеств, гомеоморфных симплексу и образующих триангуляцию этого пространства. Для описания топологических признаков и характеристик можно использовать числа Бетти. Числа Бетти – последовательность инвариантов топологического пространства. На их основе для описания объектов будут построены Баркоды. Баркод – это совокупность топологических особенностей первого (связанные симплексы первого уровня) и второго порядка (связанные симплексы второго уровня), описывающих внутреннюю и внешнюю топологию объекта, в том числе и nD объектов. Под nD объектами понимаются одни и те же объекты, отраженные на снимках за разные временные промежутки и на различных масштабах. Успешное решение задач классификации и идентификации объектов на основе их топологических характеристик с учетом масштаба отображения и времени позволит ускорить процесс обработки и анализа данных и повысить качество принимаемых решений.

Степень разработанности темы исследования. Наибольший вклад в решение задач обработки и анализа данных пространственно-распределенных объектов в ГИС внесли Сергеев В.В., Варламов А.А., Чернов А.В., Еремеев В.В. Одному из подходов в обработке и хранении цифровых карт, их анализу посвящены работы Ризаева И.С., Кошкарева А.В., Васина Ю.Г., Гальченко С.А., Шаповалова Д.А. и др.

Основные принципы обработки данных о пространственно-распределенных объектах с учетом масштаба отображения и времени фиксации базируются на работах следующих зарубежных авторов: K.A. Butler, D. Dean, K. Arroyo Otori, H. Ledoux, J.E. Stoter, Zhilin Li, Qi Zhou, D. Attali, A. Lieutier, D. Salina, J.D. Boissonnat, C. Blazquez.

В отечественной практике задача идентификации и классификации картографических объектов в плане учета их многомерности и временной составляющей была рассмотрена А.В. Гречищевым, А.А. Евсюковым, Е.П. Хлебниковой, Е.Н. Черемисиной, А.И. Алтуховым, Д.С. Коршуновым.

Таким образом, в настоящее время имеет место противоречие, состоящее в том, что существует объективная необходимость автоматизации процессов идентификации и классификации пространственно-разделенных объектов, и при этом отсутствуют адекватные модели и автоматизированные средства обработки и анализа картографической информации с учетом формы объекта, масштаба его отображения и времени фиксации.

В этой связи актуальной научно-технической задачей является разработка модели описания пространственно-распределенного объекта с учетом его формы, масштаба и времени фиксации и на ее основе алгоритмов обработки и анализа данных с применением симплициальных комплексов и персистентной гомологии.

Объект исследования. Объектом исследования является геоинформационная система идентификации и классификации пространственно-распределенных объектов.

Предмет исследования. Модель и алгоритмы идентификации, классификации и анализа данных о пространственно-распределенных объектах на цифровых изображениях местности с учетом масштаба отображения и времени.

Цель диссертационной работы. Разработка модели и алгоритмов обработки и анализа данных о пространственно-распределённых объектах на основе топологических признаков, сформированных с применением симплициальных комплексов и персистентной гомологии.

Основные задачи работы.

- Выполнить анализ состояния вопроса обработки данных о пространственно-распределенных объектах и выявить основные проблемы и противоречия.
- Сформировать математическую модель формализации данных о пространственно-распределенных объектах на основе трехмерного баркода, учитывающую временную и масштабную составляющие.

- Разработать алгоритм идентификации газовых подрывов на снимках Арктики на основе трехмерных баркодов.

- Разработать алгоритм классификации пространственно-распределенных объектов с учетом времени фиксации пространственной сцены.

- Разработать алгоритм идентификации пространственно-распределенных объектов при их отображении при различных масштабах.

- Разработать информационную систему классификации, идентификации и анализа цифровых изображений местности, провести ее апробацию и исследование работоспособности алгоритмов на примере съемки Арктики.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации» в части:

- пункта 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»;

- пункта 5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»;

- пункта 12 «Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации».

Научная новизна и положения, выносимые на защиту.

1. Модель описания пространственно-распределенных объектов, отличающаяся от известных моделей применимых в ГИС тем, что в ее основу заложены топологические особенности объекта, описываемые при помощи симплициальных комплексов и баркодов, которые позволяют учитывать в качестве третьего измерения время съемки и масштаб отображения.

2. Алгоритм формирования числовых характеристик nD (n -мерных) объектов в виде баркодов, которые учитывают пространственные характеристики и позволяют анализировать данные без учета координат. Алгоритм позволяет автоматизировать поиск газовых подрывов на снимках Арктики, тем самым увеличить скорость поиска в ~ 24 раза по отношению к ручной обработке.

3. Алгоритм идентификации пространственно-распределенных объектов при их отображении при различных масштабах. Он основан на использовании трехмерных баркодов и позволяет за счет них сопоставлять одни и те же объекты на снимках разных масштабов. Точность идентификации составила 93%.

4. Алгоритм классификации пространственно-распределенных объектов, основанный на описании структуры объекта числами Бетти, позволяет проводить анализ с учетом временных характеристик. Точность распознавания составила 94%.

Теоретическая значимость исследования. Создание модели и алгоритмов обработки пространственных данных на разных масштабах и за разные промежутки времени, которые позволят решить задачи обработки данных пространственно-распределённых объектов.

Практическая значимость исследования. Определяется тем, что разработаны модель и алгоритмы, применяемые в программном комплексе для идентификации и классификации бугров пучения (газовых подрывов) на снимках Арктики, которые применяются в Институте проблем нефти и газа РАН и в учебном процессе МИ ВлГУ. Результаты исследования поддержаны актами внедрения. Разработанные модель и алгоритмы позволяют повысить скорость обработки снимков в 24 раза за счет автоматизации процессов идентификации и классификации объектов с точностью свыше 93%.

Методы исследования. Теоретические положения, выводы и экспериментальные результаты диссертационной работы получены с использованием методов персистентной гомологии, цифровой обработки изображений, теории множеств, теории принятия решений. На основе данных методов разработана математическая модель, которая позволяет описывать объекты во времени и на разных масштабах в виде трехмерного баркода. На основе данной модели разработаны алгоритмы, выносимые на защиту.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель описания пространственно-распределенных объектов на основе трехмерного баркода, учитывающая временную и масштабную составляющие.
2. Алгоритм формирования числовых характеристик nD (n -мерных) объектов в виде баркодов.
3. Алгоритм идентификации пространственно-распределенных объектов при их отображении при различных масштабах.
4. Алгоритм классификации пространственно-распределенных объектов, основанный на описании структуры объекта числами Бетти.

Достоверность теоретических выводов и практических результатов диссертационной работы определяется:

- Корректностью использования симплициальных комплексов и положений персистентной гомологии при анализе данных о пространственно-распределённых объектах, учитывающих внутреннюю и внешнюю топологию в системах идентификации и классификации пространственно-распределённых объектов.
- Использованием разработанной модели и алгоритмов в системах классификации и идентификации пространственно-распределённых объектов для решения задач оперативного сбора и анализа данных о временных и масштабных эволюциях, что подтверждается актом внедрения.

Апробация работы. Результаты работы получены автором в результате выполнения двух грантов: грант РФФИ № 17-47-330387 «Методы и алгоритмы обработки пространственно-распределенной информации на основе персистентной гомологии» и грант РФФИ № 19-37-90080 «Разработка модели, методов и алгоритмов обработки и анализа n -мерных геообъектов на основе топологии».

Диссертационная работа и отдельные ее части обсуждались на международной конференции «ГрафиКон-2016 (ННГАСУ, г. Нижний Новгород, 2016)», международной конференции «Распознавание» (ЮЗГУ, г. Курск,

2018, 2019), международной конференции «ITNT» (Самарский университет, г. Самара, 2018, 2019), на всероссийской конференции «Зворыкинские чтения» (МИ ВлГУ, г. Муром, 2017, 2018, 2019, 2020).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 24 работы: 4 статьи, входящие в перечень ВАК; 5 работ, входящие в перечень Scopus/Web of Science; 13 тезисов докладов; 2 свидетельства о регистрации программного продукта для ЭВМ.

Личный вклад. Все выносимые на защиту положения разработаны соискателем лично. В основных научных работах по теме диссертации, опубликованных в соавторстве, вклад соискателя определен в [11, 16, 19] – проведен анализ и обзор моделей, методов и алгоритмов обработки пространственных объектов, в [1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 13, 14, 17, 21, 22] – предложены и исследованы алгоритмы идентификации и обработки объектов на основе разработанных алгоритмов и модели, в [7, 8, 9, 15, 18, 20] – результаты экспериментальных исследований на основе разработанных алгоритмов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, 4 приложений, изложенных на 105 страницах (включая 56 рисунков и 2 таблицы). Список литературы содержит 145 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, представлены методы исследования, приведено краткое содержание каждой главы диссертации.

В первой главе произведен анализ обработки пространственных объектов на основе геометрических характеристик, нейронных сетей, сегментации изображений, топологии и т.д.

Существуют методы обработки изображений на основе сегментации представленных на них объектов. Они позволяют за счет сегментации определить контур объекта и рассчитать его размер. Также на основе подобных методов можно предположить, в какой временной отрезок мог быть сделан снимок объекта. Но данные методы не позволяют описать форму объекта для его сопоставления при изменении масштаба или времени съемки объекта.

Быстроразвивающимся является подход на основе нейронных сетей. Здесь предъявляются серьезные требования к качеству обучающей выборки и ее объекту. Однако этот подход будет работать с определенными типами изображений для определенного временного промежутка или масштаба.

В методах идентификации объектов на основе геометрических характеристик объектов можно определить тип, площадь и размер объектов на карте за счет вычисления координат. Но данные методы не позволяют формулировать форму объекта, которая претерпевает незначительные деформации при изменении времени и масштаба.

Кроме того, существуют подходы, осуществляющие идентификацию пространственных объектов на основе их формы за счет топологического анализа. Но существующие подходы не производят сопоставления найденных объектов на снимках разных масштабов и за разные промежутки времени.

В итоге, для анализа изображений основополагающими являются два подхода: геометрический и топологический. Геометрические характеристики учитывают все точки объекта, их расположение и отношение между собой. При любом другом ракурсе объекта, появлении шума на изображении или небольшом изменении масштаба объект не будет распознан по геометрическим характеристикам. Преимуществом геометрических характеристик является работа с координатами, когда необходимо определять конкретные размеры или расстояния между объектами. Недостатком геометрических признаков является невозможность определять объект при любой его деформации, а также временные затраты на обработку изображений. Топологические характеристики не рассматривают метрические свойства объектов (например, расстояние между парой точек), а описывают свойства пространственных объектов, которые остаются неизменными при непрерывных деформациях.

В ходе анализа выявлены основные недостатки данных методов, такие как привязка к координатам объекта, недостаточная точность определения объектов из-за потери данных, а также снижение скорости работы алгоритмов при больших количествах обработки данных. Указанные недостатки рождают противоречие, поэтому необходим набор алгоритмов, позволяющий описать пространственные данные за разные промежутки времени и на разных масштабах, производить идентификацию и анализ на спутниковых снимках.

Во второй главе предлагается математическая модель трехмерного баркода. В основу модели предлагается взять методы персистентной гомологии, которые учитывают топологические свойства набора точек.

Основная суть модели формализации данных о пространственно-распределенных объектах на основе трехмерного баркода заключается в том, чтобы описать такие структуры, которые будут устойчиво сохраняться при деформациях и искажениях. Единственное, что не меняется при изменении масштаба и поворотах объекта, – это его форма. Топология не учитывает координаты объектов, а рассматривает его структуру. Пока форма объекта неизменна – сохраняется и его топология. Для описания топологических признаков и характеристик можно использовать числа Бетти. Каждому пространству соответствует некая последовательность чисел Бетти. Нулевое число Бетти соответствует топологической особенности первого порядка, а первое число Бетти соответствует топологической особенности второго порядка. На их основе для описания объектов будут построены баркоды.

Обработка снимков происходит следующим образом.

Шаг 1. На вход подается растровое изображение с пространственными объектами.

Шаг 2. Изображение приводится к градации серого.

Шаг 3. Производится нормализация изображения (яркость и контрастность приводятся к средним значениям).

Шаг 4. Происходит отделение точек объекта от точек фона на основе метода Оцу за счет вычисления порога яркости P .

Шаг 5. Точки разделяются на отдельные объекты.

Шаг 6. Для каждого объекта строятся баркоды.

Рассмотрим подробнее шаг 6:

- Вокруг каждого пикселя строится окрестность Мура. Окрестность Мура – это совокупность восьми точек в окрестности 3×3 , где средняя является вершиной.

- Когда в окрестности Мура рядом с центральным пикселем существует точка, имеющая значение яркости меньшее или равное текущей, тогда образуется топологическая особенность первого порядка e . Данные e запоминаются в списке и формируют набор топологических особенностей первого порядка. Значения топологической характеристики e определим как $e[I_C^O(x, y)] = \{(d_i, l_i)\}$, где d_i – значение яркости, на котором была образована топологическая особенность, l_i – длина существования топологической особенности, $\{(d_i, l_i)\}$ – множество яркостей и длин существования топологической особенности, а $c = 1, 2, \dots, m'$, где m' – количество объектов на изображении.

- В процессе обратного прохождение при появлении в окрестности Мура трех соседних точек (центральная точка и две соседние точки, близкие по яркости) происходит их соединение. В итоге, под топологической особенностью второго порядка понимаются наборы из трех точек, имеющих близкие по значению яркости. Значения функции определим как $h[I_C^O(x, y)] = \{(d_i, l_i)\}$, где h – это топологическая особенность второго порядка.

После полного прохождение строится баркод, который состоит из двух полученных выше множеств топологических особенностей первого и второго порядка: $B(I_C^O(x, y)) = (B^e(I_C^O(x, y)), B^h(I_C^O(x, y)))$, $B^e(I_C^O(x, y)) = \{e_0(I_C^O(x, y)), \dots, e_n(I_C^O(x, y))\}$ и $B^h(I_C^O(x, y)) = \{h_0(I_C^O(x, y)), \dots, h_v(I_C^O(x, y))\}$, где $B^e(I_C^O(x, y))$ – баркод, который состоит из множества топологических особенностей первого порядка, $B^h(I_C^O(x, y))$ – баркод, состоящий из множества топологических особенностей второго порядка, где n и v – количество топологических особенностей первого и второго порядка соответственно.

В итоге, обработав все полученные объекты из исходного изображения $I(x, y)$, формируется множество баркодов:

$$B(I(x, y)) = \{B_1(I_C^O(x, y)), B_2(I_C^O(x, y)), \dots, B_{j'}(I_C^O(x, y))\}, \text{ где } j' - \text{количество баркодов объектов на изображении.}$$

Для анализа объектов за разные временные промежутки и на разных масштабах определим трехмерные баркоды изображений.

Такой подход позволит анализировать объекты на разных масштабах с учетом эволюции объекта во времени.

Для анализа множества объектов, в том числе за разные временные промежутки и на разных масштабах, построим трехмерные баркоды изображений:

Пусть $B_{3D} = \{B_i\}$, где баркоды, лежащие в диапазоне $i = 1, 2, \dots, \eta$, а η – количество баркодов. $B_i = (B_i^e(I(x, y)), B_i^h(I(x, y)), q_i)$ – это баркод объекта i с

определенными характеристиками, где $B_i^e(I(x, y))$ – баркод объекта i , состоящий из множества топологических особенностей первого порядка, а $B_i^h(I(x, y))$ – баркод объекта i , состоящий из множества топологических характеристик второго порядка, q – третья составляющая баркода, которая может принимать значения времени t или масштаба s .

Построим матрицу трехмерного баркода данных изображений за различные временные промежутки t :

$$A(B_{3D}^t) = \begin{bmatrix} B_{1,1}^t & B_{1,2}^t & \dots & B_{1,k}^t \\ B_{2,1}^t & B_{2,2}^t & \dots & B_{2,k}^t \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{n',1}^t & B_{n',2}^t & \dots & B_{n',k}^t \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\{B_{1,1}^t, B_{2,1}^t, \dots, B_{n',k}^t\}$ – набор баркодов за разные промежутки времени, а матрица $A(B_{3D}^t)$ состоит из строк α в диапазоне $\alpha = 1, 2, \dots, n'$ и столбцов $\gamma = 1, 2, \dots, k$, где n' – количество элементов в строке, а k – количество элементов в столбце.

Матрица $A(B_{3D}^t)$ рассчитывается следующим образом.

Изначально находятся баркоды $\{B_{1,1}^t, \dots, B_{n',1}^t\}$ на первом изображении и записываются в столбец α . Далее идет анализ баркодов следующих изображений, если $B_{1,2}^t = B_{1,1}^t$, то они записываются в одну строку, и так пока баркоды изображений не закончатся $\alpha_1 = \bigcup_1^k \{B_{1,1}^t, B_{2,1}^t, \dots, B_{1,k}^t\}$ или $\alpha_1 = B_1^e(I(x, y)), B_1^h(I(x, y), t_1) \cup B_2^e(I(x, y)), B_2^h(I(x, y), t_2) \cup B_k^e(I(x, y)), B_k^h(I(x, y), t_n)$.

Если найден баркод, которому не соответствуют ранее найденные баркоды объектов (объекты на разных снимках за разное время съемки), то он записывается в отдельную строку $\alpha_2 = \bigcup_1^k \{null, B_{2,2}^t, \dots, B_{2,k}^t\}$, где null указывает, что на предыдущем изображении отсутствует данный объект.

Если на каком-то из последующих изображений объект отсутствует, соответственно отсутствует и его баркод, и строка в матрице выглядит следующим образом $\alpha_3 = \bigcup_1^k \{B_{3,1}^t, B_{3,2}^t, null, B_{3,k}^t\}$.

В итоге получаем трехмерный баркод. Трехмерный баркод – это множество баркодов одного и того же объекта на разных масштабах или за различные промежутки времени.

Каждый столбец матрицы отображает снимки одного и того же объекта, но с небольшими деформациями, т.к. снимки сделаны либо на разных масштабах, либо за различные временные промежутки. Запишем данные в столбец γ_1

как $\gamma_1 = \bigcup_1^{n'} \{B_{1,1}^t, B_{2,1}^t, \dots, B_{n',1}^t\}$ или $\gamma_1 = (B_1^e(I(x, y)), B_1^h(I(x, y), t_1) \cup (B_2^e(I(x, y)), B_2^h(I(x, y), t_2) \cup (B_{n'}^e(I(x, y)), B_{n'}^h(I(x, y), t_{n'}))$.

В итоге во второй главе разработана математическая модель, которая позволяет описывать пространственные структуры на основе трехмерных баркодов. Это дает возможность производить анализ и обработку пространственных объектов на растровых снимках с использованием топологии объектов.

В третьей главе представлены алгоритмы, выносимые на защиту.

Алгоритм идентификации газовых подрывов на снимках Арктики на основе трехмерных баркодов. Данная задача была поставлена лабораторией комплексного геолого-геофизического изучения и освоения нефтегазовых ресурсов континентального шельфа Института проблем нефти и газа РАН. В настоящее время идентификация газовых подрывов производится геофизиком вручную.

Исходными данными являются снимки Арктической местности, сделанные со спутника (при наличии снежного покрова).

Алгоритм идентификации газовых подрывов на снимках Арктики на основе трехмерных баркодов выглядит следующим образом:

1. Производится первоначальное обучение. На снимках выделяют несколько однотипных объектов и находятся их баркоды.

2. Задается диапазон из минимального и максимального значений, полученных баркодов.

3. На вход подается растровое изображение Арктической местности.

4. Производится первоначальная обработка снимка. Изображение нормализуется путем корректировки средней яркости и контрастности.

5. Производится выделение контуров на основе метода Кэнни, суть которого заключается в обнаружении границ изображения.

6. Внутри каждого полученного контура определяется наличие освещения. Если объект имеет засвеченную сторону от солнечного света, то это может быть газовый подрыв

$L_{cp}(I(x, y)) = \frac{1}{\ell} \sum_{i=1}^Z \sum_{j=1}^M L(x_i, y_j) > P$, где $L_{cp}(I(x, y))$ –

средняя яркость южной части объекта, $\sum_{i=1}^Z \sum_{j=1}^M L(x_i, y_j)$ – суммы яркостей южной

части изображений, где $i = 1, 2, \dots, Z$ и $j = 1, 2, \dots, M$ – номера пикселя, P – пороговое значения яркости, полученное при использовании метода Оцу, а ℓ – количество изображений.

7. Для каждого изображения строится баркод.

8. Осуществляется поиск данных баркодов в диапазоне, полученном в п. 1. Если баркод попадает в данный диапазон – объект внутри контура является искомым объектом

$I_{\delta}(x, y) \in [\min(l_i(B_{\varepsilon})) < \max(l_i(B(I(x, y)))) < \max(l_i(B_{\varepsilon}))]$,

где $I_{\delta}(x, y)$ – газовый подрыв, $B(I(x, y))$ – баркод объекта, B_{ε} – эталонный баркод для газовых подрывов, l_i – длина существования топологических особенностей.

Разработанный алгоритм позволяет идентифицировать газовые подрывы на снимках Арктики.

Алгоритм идентификации пространственных объектов на снимках за разные промежутки времени на основе трехмерных баркодов. Алгоритм производит сопоставление на основе топологических признаков, в данном случае с использованием трехмерных баркодов, основанных на методах персистентной гомологии.

Отобразим трехмерный баркод B_{3D}^t за разные промежутки времени в виде массива $M(B_{3D}^t)=[B_{1,1}^t, B_{2,1}^t, \dots, B_{\tau,1}^t]$, где τ – это номер объекта, для которого построен баркод.

Если баркоды рассчитывались для изображений, на которых находится несколько объектов, то трехмерные баркоды можно отобразить в виде матрицы (1).

Существует множество групп объектов, например, горы, реки, здания, водоемы, множество их подклассификаций и т.д. Рассмотрим описание алгоритма на примере эталонных баркодов водоема, здания и лесной местности.

Эталонные баркоды в определенные временные промежутки записываются как $B^t(\varepsilon_1)$, $B^t(\varepsilon_2)$ и $B^t(\varepsilon_\tau)$.

Сравнение происходит следующим образом:

Имеется любой баркод $B^t(I(x, y))$, если он соответствует одному из эталонных баркодов, то объект на изображении $I(x, y)$ относится к определенному классу объектов ε_i , где $i=1, 2, \dots, \tau$, а τ – количество объектов. Если у каждого объекта есть равные значения топологических особенностей второго порядка, имеющих одинаковую максимальную длину l , то они идентичны.

Пусть на изображении $I(x, y)$ находится ε_1 , тогда:

$$B^t(I(x, y)) = \begin{bmatrix} B^t(\varepsilon_1) \\ B^t(\varepsilon_2) \\ B^t(\varepsilon_\tau) \end{bmatrix} = ((\max(l_i(B^t(I(x, y)))) = \max(l_i(B(\varepsilon_1))), B_i^h(I(x, y)) = B_i^h(\varepsilon_1)) = B^t(\varepsilon_1).$$

Отсюда можно сделать вывод, что изображение $I(x, y)$ относится к классу ε_1 .

Результатом работы алгоритма является идентификация объектов на снимках за разные временные промежутки на основе полученных трехмерных баркодов.

Алгоритм анализа пространственных объектов при изменении масштабов. Алгоритм предназначен для сопоставления объектов по их форме вне зависимости от их размера и для анализа объектов на различных масштабах.

Определением баркода $B_{3D}^s = \{B_{1,1}, B_{1,2}, \dots, B_{1,k'}\}$ на разных масштабах является последовательность баркодов одного и того же объекта или пространственной сцены на определенном масштабе $s_1, s_2, \dots, s_{c'}$ соответственно, причем $s_1 < s_2 < \dots < s_{c'}$ ($c' \in \mathbb{N}$), где $\mathbb{N}$ – множество натуральных чисел.

Построим массив и матрицу для трехмерных баркодов на разных масштабах.

$$B_{3D}^s = \begin{bmatrix} B_{1,1}^s \\ B_{2,1}^s \\ \dots \\ B_{c',1}^s \end{bmatrix}, \quad A(B_{3D}^s) = \begin{bmatrix} B_{1,1}^s & B_{1,2}^s & \dots & B_{1,k'}^s \\ B_{2,1}^s & B_{2,2}^s & \dots & B_{2,k'}^s \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{c',1}^s & B_{c',2}^s & \dots & B_{c',k'}^s \end{bmatrix},$$

где s – масштаб изображения, а матрица $A(B_{3D}^s)$ состоит из строк α в диапазоне $\alpha = 1, 2, \dots, c'$ и столбцов $\gamma = 1, 2, \dots, k'$, где c' – количество элементов в строке, а k' – количество элементов с столбце.

Для анализа объектов на разных масштабах рассмотрим матрицу по столбцам. Возьмем первый столбец $\{B_{1,1}^s, \dots, B_{c',1}^s\}$ из матрицы $A(B_{3D}^s)$, где $B^s(I(x, y)) = (B_{1,1}^e(I(x, y)), B_{1,1}^h(I(x, y)), s_1), \dots, (B_{c',1}^e(I(x, y)), B_{c',1}^h(I(x, y)), s_{c'}).$

Затем, сопоставив множества топологических особенностей первого и второго порядка в данном столбце, определим, относятся ли данные баркоды к одному и тому же объекту (максимальное отклонение 1%):

$$B_{3D}^s = (B_{1,1}^e(I(x, y)), B_{1,1}^h(I(x, y)), s_1) \approx (B_{2,1}^e(I(x, y)), B_{2,1}^h(I(x, y)), s_2) \approx, \dots, \approx (B_{c',1}^e(I(x, y)), B_{c',1}^h(I(x, y)), s_{c'}).$$

Сопоставив баркоды одного и того же объекта в каждом столбце, можно сделать вывод, что форма данных баркодов является схожей. Отличается только количество топологических особенностей, чем меньше масштаб, тем меньше в баркоде их содержится.

В итоге, в третьей главе разработаны алгоритмы, которые на основе трехмерных баркодов позволяют производить идентификацию пространственных объектов, а также выполнять анализ пространственных объектов на разных масштабах, вычисляя их сходства. Данные алгоритмы позволили автоматизировать обработку снимков Арктической местности в части идентификации газовых подрывов, увеличив время обработки снимка до ~24 раз. Алгоритмы использовались на снимках размерностью в диапазоне от 2900x1990 до 8500x11990. Всего было обработано 9850 объектов.

В четвертой главе разработано приложение для идентификации газовых подрывов на снимках Арктики.

Приложение производит поиск газовых подрывов на снимках Арктики на основе трехмерных баркодов.

Время поиска также зависит от мощности персонального компьютера (ПК). В среднем обработка снимка размерностью 3500x2100 занимает 155 минут.

Приложение дополнено специальными настройками, которые позволяют регулировать выделение газовых подрывов на различных снимках:

«Минимальный и максимальный размер контура», «Минимальная яркость на изображении», «Минимальная и максимальная длина трехмерного баркода» и т.д.

В итоге в четвертой главе разработано приложение, которое позволяет производить обучение на снимках, выполнять идентификацию бугров пучения, сохранять их координаты и характеристики в csv файл, нумеровать газовые подрывы на снимках, а также сохранять обработанный снимок в большинстве графических форматов.

В пятой главе производятся экспериментальные исследования для разработанной модели и алгоритмов.

Рассмотрим выделение бугров пучения на снимках Арктической местности.

Основные характеристики баркодов были получены после прохождения более 120 снимков с газовыми подрывами.

Далее производилась идентификация газовых подрывов. Примеры их выделения отображены на рисунке 1.

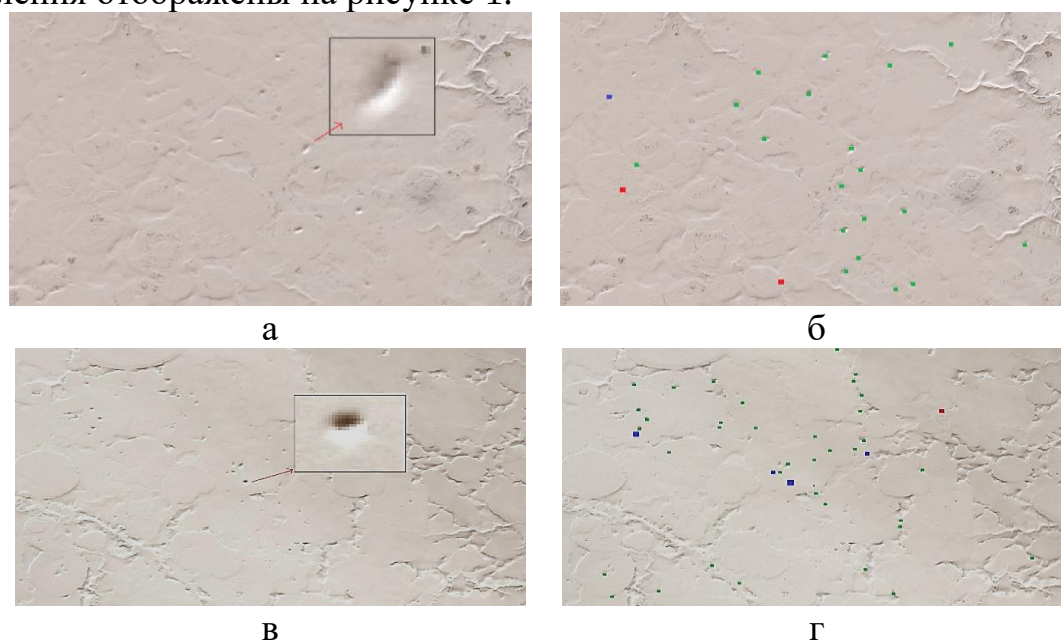


Рисунок 1 – Снимки арктической местности с выделенными буграми.

На рисунке 1 (а, в) отображены исходные снимки, а на рисунке 1 (б, г) отображены снимки с выделенными буграми, где зеленым цветом помечены бугры, которые выделены верно, красным отмечены бугры, которые выделены неверно, а синим – бугры, которые не были выделены.

В результате на рисунке 1(б) выделено 22 бугра. Точность определения 90,9%. На рисунке 1 (г) выделено 36 бугров. Точность определения 92,3%.

На основе сопоставления работы алгоритма и ручной обработки данных снимков была составлена таблица 1.

Таблица 1 – Сравнение существующих и разработанных алгоритмов

	Кол-во обр. сним- ков	Количество бугров пуче- ния	% identifica- ции	Время вы- полнения обработки
Разработанный алгоритм	250	9850	93%	1 час 20 ми- нут
Ручная обра- ботка	250	9850	99%	Не менее 48 часов

На основе таблицы 1 можно сделать вывод, что разработанные алгоритмы позволяют значительно сократить время распознавания бугров пучения на снимках Арктики (минимум в 24 раза) и снять задачу по выделению объектов вручную со специалиста по геофизике.

Проведем исследование алгоритма идентификации объектов за разные промежутки времени на снимках водоема за разные годы, которые отражены на рисунке 2 (а, б, в).



Рисунок 2 – Эволюция водоема за несколько лет

(а) – снимок за 1984 г; (б) – снимок за 2005 г; (в) – снимок за 2016 г

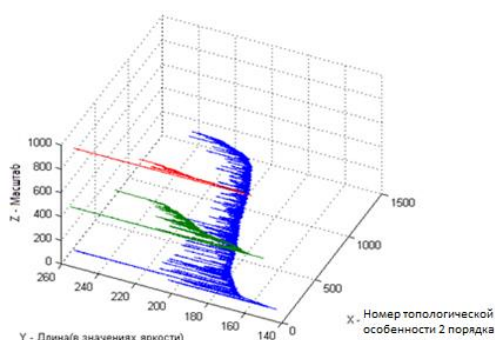


Рисунок 3 - График трехмерного баркода для водоемов за несколько лет

Исходя из графика на рисунке 3, можно сделать вывод, что баркоды за 1984, 2005 и 2016 года схожи по строению и у каждого объекта есть равные топологические особенности второго порядка, имеющие одинаковую максимальную длину существования $\max(l_i(B_1)) = \max(l_i(B_2)) = \max(l_i(B_3))$, которая находится в диапазоне яркости от 160 до 253.

Теперь проведем исследование алгоритма на снимках водоема на разных масштабах, которые отражены на рисунке 4 (а, б, в).



Рисунок 4 – Снимки водоема на разных масштабах

(а) – масштаб 1:500; (б) – масштаб 1:1000; (в) – масштаб 1:2000

На рисунке 4 (а, б, в) видно, что это один и тот же водоем, имеющий одинаковую структуру и форму, но на рисунках водоем имеет разную площадь. Далее строится трехмерный баркод для данных изображений. График данного баркода отражен на рисунке 5.

Исходя из графика на рисунке 5, можно сделать вывод, что баркоды на масштабах 1:500, 1:1000, 1:2000 имеют схожую форму и у каждого объекта есть равные топологические особенности второго порядка, имеющие одинаковую максимальную длину $\max(l_i(B_1)) = \max(l_i(B_2)) = \max(l_i(B_3))$, которая находится в диапазоне яркости от 145 до 254.

Сам баркод зависит от масштаба: чем меньше у объекта пикселей, тем меньше топологических особенностей второго порядка имеет баркод.

В итоге, в пятой главе произведено исследование функционирования разработанной математической модели и алгоритмов. Сопоставление с использованием трехмерных баркодов позволило сделать вывод, что топология объектов и их баркоды не изменяются во времени и на разных масштабах. Точность идентификации объектов составила 93%, а скорость обработки выросла в ~24 раза.

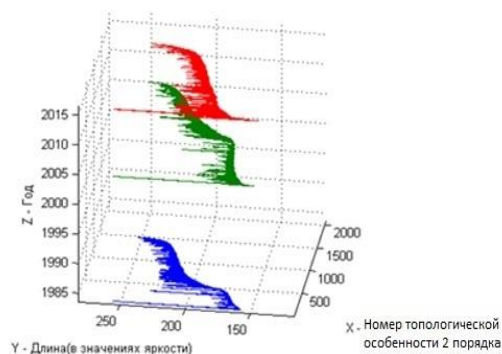


Рисунок 5 - График трехмерного баркода для водоема на разных масштабах

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Произведен анализ вопроса обработки данных о пространственно-распределенных объектах и выявлены основные проблемы и противоречия. Анализ показал необходимость разработки новых алгоритмов для идентификации и классификации объектов. Определены направления исследования.

2. Построена математическая модель формализации данных о пространственно-распределенных объектах на основе трехмерного баркода, учитывающая временную и масштабную составляющие. Она позволяет описать такие структуры, которые будут устойчиво сохраняться при топологических деформациях и искажениях.

3. Разработан алгоритм идентификации газовых подрывов на снимках Арктики на основе трехмерных баркодов. Данный алгоритм позволяет определять форму газовых подрывов, учитывая их характеристики, тем самым идентифицируя их на снимках Арктической местности.

4. Разработан алгоритм классификации пространственно-распределенных объектов с учетом времени фиксации пространственной сцены. Данный алгоритм учитывает пространственные характеристики и позволяет анализировать данные без учета координат. Результатом работы алгоритма является классификация объектов на снимках за разные временные промежутки на основе полученных трехмерных баркодов.

5. Разработан алгоритм идентификации пространственно-распределенных объектов при их отображении на различных масштабах, позволяющий проводить анализ с учетом временных и масштабных характеристик.

Произведены экспериментальные исследования разработанной математической модели и алгоритмов. Они показали, что сопоставление с использованием трехмерных баркодов позволяет сделать вывод, что топология объектов и их баркоды не изменяются во времени и на разных масштабах. Точность идентификации объектов составила 93%.

6. Разработана информационная система классификации, идентификации и анализа цифровых изображений местности. Она позволила автоматизировать процесс определения бугров пучения (газовых подрывов) на снимках

Арктики, тем самым это позволило сократить скорость обработки одного снимка в ~24 раза.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях перечня ВАК

1. Андрианов Д.Е., Еремеев С.В., Купцов К.В., Ковалев Ю.А. Алгоритм идентификации пространственных объектов растровой карты на основе топологического анализа данных // Телекоммуникации. – 2017. – № 7. – С. 39-44.
2. Еремеев С.В., Андрианов Д.Е., Ковалев Ю.А. Алгоритм идентификации временных эволюций пространственно-распределенных объектов на основе Баркодов // Геоинформатика. – 2018. – № 4. – С. 23-29.
3. Ковалев Ю.А. Алгоритм идентификации пространственных объектов на снимках за разные промежутки времени и на различных масштабах на основе трехмерных баркодов // Вестник РГРТУ. – 2020. – № 74. – С. 89-98.
4. Еремеев С.В., Андрианов Д.Е., Ковалев Ю.А., Титов Д.В. Разработка методов обработки пространственных структур на спутниковых изображениях // Изв. вузов. Приборостроение. – 2021. – № 1 (64). – С. 21-31.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных (Web of Science и/или Scopus)

5. Andrianov D. E., Ereemeev S. V., Kovalev. Y. A., Kuptsov K. V. Algorithm for encoding nD spatial objects into GIS // CEUR Workshop Proceedings. Image Processing and Earth Remote Sensing. Information Technology and Nanotechnology. – 2018. – Vol. 2210. – P. 149-155.
6. Ereemeev S. V., Kovalev. Y. A., Kuptsov K. V. A research of classification algorithm of spatial information on the basis of methods of persistent homology and random forest // CEUR Workshop Proceedings. Data Science. Information Technology and Nanotechnology. – 2018. – Vol. 2212. – P. 165-171.
7. Andrianov D.E., Ereemeev S.V., Kovalev Y.A. Algorithm for constructing three-dimensional barcodes to represent nD spatial objects in GIS // CEUR Workshop Proceedings ITNT 2019 - Proceedings of the 5th Information Technology and Nanotechnology 2019: Image Processing and Earth Remote Sensing. –2019. – Vol. 2391. – P. 206-210.
8. Andrianov D. E., Ereemeev S. V., Kovalev. Y. A. Identification of spatial objects with the same topological structure in images from different times of the year // SGEM2020 Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2.1. – P. 507-514.
9. Andrianov D. E., Ereemeev S. V., Kovalev. Y. A. Method for extracting information on the topology of an n-dimensional map // SGEM2020 Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2.1. – P. 515-522.

Публикации в других изданиях

10. Ковалев Ю.А. Алгоритм поиска пространственных объектов по заданным критериям на основе буферных зон // Электронный научный журнал «Алгоритмы, методы и системы обработки данных». – 2015. – № 4 (33). – С. 48-54.

11. Ковалев Ю.А. Алгоритм поиска пространственных объектов на векторных картах с использованием буферных зон // Труды всероссийской конференции "Молодежь России": Всероссийские научные Зворыкинские чтения – VIII. – 2016. – С. 87.
12. Ковалев Ю.А., Еремеев С.В. Алгоритм поиска пространственных объектов по заданным критериям на основе буферных зон в многомасштабных ГИС // Труды 26-й Международной научной конференции «ГРАФИКОН'2016». – 2016. – С. 414-416.
13. Ковалев Ю.А., Еремеев С.В. Алгоритм классификации пространственных объектов на основе модели Random forest // Электронный научный журнал «Алгоритмы, методы и системы обработки данных». – 2017. – № 2 (35). – С. 15-21.
14. Ковалев Ю.А. Методы и алгоритмы обработки многомасштабных данных в ГИС // Труды всероссийской конференции "Молодежь России": Всероссийские научные Зворыкинские чтения – IX. – 2017. – С. 513.
15. Ковалев Ю.А., Еремеев С.В., Купцов К.В. Исследование алгоритма классификации пространственной информации на основе методов персистентной гомологии и random forest // Сборник трудов ИТНТ-2018. Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. – 2018. – С. 2384-2390.
16. Ковалев Ю.А., Еремеев С.В., Купцов К.В., Андрианов Д.Е. Алгоритм кодирования nD пространственных объектов в ГИС // Сборник трудов ИТНТ-2018. Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. – 2018. – С. 800-805.
17. Ковалев Ю.А., Еремеев С.В., Андрианов Д.Е. Алгоритм поиска различий у пространственных объектов, изменяемых во времени, на основе Баркода // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2018. – № 1. – С. 481-483.
18. Ковалёв Ю.А., Еремеев С.В. Анализ временных эволюций nD объектов на основе компьютерной топологии // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. Распознавание – 2018. Сборник материалов XIV международной научно-технической конференции. – 2018. – С. 139-140.
19. Андрианов Д.Е., Еремеев С.В., Ковалев Ю.А. Алгоритм построения трехмерных Баркодов для представления nD пространственных объектов в ГИС // Сборник трудов ИТНТ-2019 Под редакцией В.В. Мясникова. – 2019. – С. 188-192.
20. Андрианов Д.Е., Еремеев С.В., Ковалёв Ю.А. Технология описания пространственно-временных эволюций объектов в ГИС на основе трехмерных баркодов // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов и обработки изображений. Распознавание – 2019. Сборник материалов XV Международной научно-технической конференции. – 2019. – С. 34-36

21. Andrianov D.E., Ereemeev S.V., Kovalev Y.A. Algorithm for analysis of spatial scenes and objects in geoinformation systems // *İnformasiya texnologiyaları problemləri.* – 2019. – Vol. 2. – P. 9–13.

22. Андрианов Д.Е., Еремеев С.Е., Ковалёв Ю.А. Алгоритмы анализа и обработки снимков на основе баркодов // *Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2020. Сборник трудов III Международного научно-технического форума.* – Рязань. – 2020. – С. 223-227.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

23. Ковалев Ю.А., Еремеев С.В., Андрианов Д.Е. Программный комплекс для построения трехмерных баркодов // *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020662951 (регистрация в Реестре – 21.10.2020).*

24. Ковалев Ю.А., Еремеев С.В., Андрианов Д.Е. Приложение для идентификации пространственных объектов на спутниковых снимках на основе трехмерных баркодов // *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020663389 (регистрация в Реестре – 27.10.2020).*

Ковалев Юрий Анатольевич

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАСШТАБНЫХ И ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бумага офисная. Печать цифровая.
Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.