

*На правах рукописи*



**ЮДАКОВ Антон Александрович**

**АЛГОРИТМЫ СЕГМЕНТАЦИИ  
ОБЪЕКТОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ПО ДАННЫМ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ**

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

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Рязань 2013**

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» (РГРТУ)

Научный руководитель: **Еремеев Виктор Владимирович**  
доктор технических наук, профессор,  
директор НИИ обработки аэрокосмических изображений РГРТУ

Официальные оппоненты: **Клочко Владимир Константинович**  
доктор технических наук, заведующий кафедрой эконометрики и математического моделирования РГРТУ

**Блохин Алексей Николаевич**  
кандидат технических наук, начальник лаборатории Научно-конструкторского центра ОАО «Государственный Рязанский приборный завод»

Ведущая организация: **Научный центр оперативного мониторинга Земли Корпорации «Российские космические системы», г. Москва**

Защита состоится **18 сентября 2013 года в 12 ч** на заседании диссертационного совета Д 212.211.01 в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу:  
**390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан 10 июля 2013 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.211.01  
канд. техн. наук, доцент



**Пржегорлинский В.Н.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность диссертации и степень разработанности темы.

Гиперспектральная съемка является приоритетным направлением развития систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Она предполагает одновременное получение сотен и тысяч изображений одной и той же сцены, зафиксированных в очень узких соприкасающихся диапазонах спектра. В результате формируется многомерное гиперспектральное изображение (ГСИ), называемое гиперкубом. Каждой точке земной поверхности гиперкуб ставит в соответствие спектральную характеристику (СХ), которая описывает распределение энергии излучения по длине волны. Знание СХ для множества точек вполне определенных объектов позволяет автоматизировать процесс сегментации объектов и установить их физико-химические свойства. Поэтому материалы гиперспектральной съемки находят широкое применение во многих сферах человеческой деятельности: экологии, сельском и лесном хозяйствах, анализе атмосферы, поиске полезных ископаемых, военной сфере и др.

Гиперспектральная съемка начала внедряться в практику ДЗЗ совсем недавно. За рубежом работы в этом направлении начаты 12 лет назад и активно развиваются. Создан ряд образцов гиперспектральной аппаратуры (ГСА) космического и авиационного базирования, лучшими из которых являются: Hyperion (TRW Inc., США, 2000 г.); CHRIS (Sira Technology Ltd, Великобритания; Verhaert Design and Development, Бельгия, 2001 г.); NICO (The Aerospace Corporation, Johnson Space Center, США, 2009 г.); HSI (Kayser-Threde GmbH, German Research Centre for Geosciences, Германия, планируется к использованию в 2015 г.). Каждая из указанных фирм-разработчиков ГСА включает десятки специализированных научно-производственных организаций.

В нашей стране впервые ГСА выведена на орбиту на спутнике МКА-ФКИ (головной разработчик – НПО им. С.А. Лавочкина) в июле 2012 года. В соответствии с Федеральной космической программой России на 2006-2015 годы в ближайшее время планируется запуск серии спутников, оснащенных ГСА: с 2013 г. – в составе космической системы «Ресурс-П» №1, №2, №3 (головной разработчик – Ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс»); с 2015 г. – в составе космической системы «Обзор-О» (головной разработчик – Космический научно-производственный центр им. М.В.Хруничева).

Широко известны в России научно-инженерные школы по созданию ГСА и средств обработки получаемой от нее информации: это предприятия ракетно-космической промышленности – Красногорский завод им. С.А. Зверева, Ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс», ЦНИИмаш, НПО им. С.А. Лавочкина, Корпорация «ВНИИЭМ», Центр Келдыша, НПО «Лептон», НПП «ЭЛАР», Госцентр «Природа», НИЦ «Планета»; это вузы и институты РАН – ВКА им. А.Ф.Можайского, МФТИ, МГТУ им. Н.Э.Баумана, РГРТУ, НТЦ уникального приборостроения, ВНИИ физико-технических измерений, Институт физики атмосферы, МГУ им. М.В. Ломоносова и др.

В то же время ГСИ – это принципиально новый вид информации о земной поверхности, развитие средств ее получения и обработки находятся в самой начальной стадии. Особую актуальность приобретают вопросы создания методов и средств обработки этой специфичной информации. Основной задачей, для решения которой собственно и создается ГСА, является повышение уровня автоматизации процессов сегментации и последующей классификации объектов наблюдаемой сцены.

Анализ характерных свойств гиперспектральных изображений показывает наличие сильной корреляции между отдельными элементами гиперкуба как в пространственной, так и в спектральной области. Другой характерной особенностью ГСИ является значительное влияние на спектральные характеристики ряда искажающих факторов: условий съемки и освещенности земной поверхности, состояния атмосферы, сезонности наблюдений, погодных условий и др. Все это вносит некоторую неопределенность в отображение объектов, регистрируемых в различных спектральных диапазонах, и, кроме того, приводит к размыванию границ переходов от одного объекта к другому. В связи с этим автор считает, что наиболее перспективным направлением по сегментации объектов на ГСИ является совместное применение алгоритмов кластеризации в условиях неопределенности (в частности, FCM-, PCM- и PFCM-алгоритмов), обеспечивающих разбиение на кластеры с учетом свойств кластерной относительности и/или кластерной типичности. Настоящая диссертационная работа посвящена исследованию комплексной применимости данных алгоритмов при решении задачи сегментации ГСИ.

**Цель диссертации** заключается в создании высокоэффективных алгоритмов сегментации объектов земной поверхности по данным гиперспектральной съемки с использованием методов искусственного интеллекта: алгоритмов кластеризации на основе нечетких множеств, искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов.

Для достижения поставленной цели решаются следующие основные задачи:

- проводится анализ отечественного и зарубежного опыта создания математических и технических средств сегментации объектов на гиперспектральных изображениях;
- разрабатываются алгоритмы сегментации гиперспектральных изображений с использованием методов искусственного интеллекта;
- создаются алгоритмы субоптимальной сегментации объектов на гиперспектральных изображениях с использованием ансамбля алгоритмов нечеткой кластеризации;
- проводятся экспериментальные исследования на натурной информации от различных систем гиперспектральной съемки разработанных алгоритмов сегментации, оценка их качественных характеристик и определение области использования.

**Научная новизна** работы заключается в том, что впервые предлагаются гибридные алгоритмы, основанные на методах искусственного интеллекта для комплексного решения задачи сегментации объектов на гиперспектральных снимках, а так же алгоритмы поиска в базе данных эталонных гиперспектральных объектов в условиях неопределенности.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- алгоритмы повышения качества сегментации гиперспектральных изображений путем комплексного использования алгоритмов нечеткой кластеризации, генетических алгоритмов и искусственных нейронных сетей;
- алгоритм субоптимальной сегментации гиперспектральных изображений, основанный на максимизации с помощью генетических алгоритмов совокупной информации, полученной с использованием различных подходов нечеткой кластеризации;
- алгоритм повышения точности сегментации гиперспектральных изображений за счет обобщенного анализа результатов нечеткой кластеризации на основе формирования консолидированной матрицы подобия меток кластеров объектов;
- алгоритм разбиения графа, соответствующего матрице подобия меток кластеров объектов, основанный на применении спектральной фильтрации и алгоритма нечетких  $c$ -средних;
- результаты экспериментальной оценки показателей качества сегментации гиперспектральных изображений с применением разработанных алгоритмов нечеткой кластеризации и с привлечением информации от различной ГСА отечественного и зарубежного производства.

**Практическая ценность** работы состоит в том, что на базе предложенных в диссертации алгоритмов разработаны программные комплексы, используемые при обработке гиперспектральных изображений от космических систем «Ресурс-П» в Научном центре оперативного мониторинга Земли Корпорации «Российские космические системы» и в Институте систем обработки изображений РАН. Результаты работы также используются в учебном процессе в дисциплинах «Элементы теории нечетких множеств» и «Системы искусственного интеллекта».

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международной и всероссийских научно-технических конференциях. Всего сделано 15 докладов. На международной конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань, 2012). На всероссийских научно-технических конференциях: «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (Москва, 2012); «Новые информационные технологии в на-

учных исследованиях и в образовании» (Рязань, 2011, 2012); «Гиперспектральные приборы и технологии» (Красногорск, 2013); «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2011, 2012); «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (Самара, 2011).

**Публикации.** По результатам диссертационных исследований опубликованы 29 работ: 12 статей (3 статьи в изданиях по списку ВАК), 15 тезисов докладов на международной и всероссийских конференциях, 2 свидетельства на регистрацию программ.

**Внедрение результатов работы.** Диссертационная работа выполнена в Рязанском государственном радиотехническом университете в рамках ОКР 9-09, ОКР 10-10, ОКР 3-11, НИР 15-12Г. Результаты работы в виде алгоритмов и программного обеспечения внедрены в Институте систем обработки изображений РАН, в Научном центре оперативного мониторинга Земли Корпорации «Российские космические системы», в учебном процессе РГРТУ, что подтверждается актами.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Основной текст работы содержит 147 стр., 22 рисунка и 17 таблиц. Список литературы содержит 15 стр. и включает 161 наименование. В приложении приведены акты о внедрении результатов диссертации.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*В главе 1 выполнен анализ методов сегментации и идентификации объектов земной поверхности по данным гиперспектральной съемки. Рассмотрены отечественные и зарубежные системы гиперспектральной съемки, известные методы сегментации и идентификации ГСИ, обоснованы направления научных исследований на базе методов искусственного интеллекта.*

По результатам анализа отечественной и зарубежной ГСА показано, что она является принципиально новым типом аппаратуры, которая дает информацию, имеющую ряд специфических особенностей. В связи с этим требуется разработка новых методов, алгоритмов и программных средств обработки гиперспектральных данных.

Рассмотрены наиболее передовые отечественные и зарубежные методы и средства решения задачи сегментации изображений. Установлено, что известные подходы не учитывают нечеткую природу формирования ГСИ и неоднозначность определения границ объектов в гиперспектральном пространстве. Обоснована актуальность научных исследований по совершенствованию технологий сегментации на основе использования методов искусственного интеллекта.

По результатам выполненного анализа определена необходимость в проведении научных исследований по следующим трем направлениям.

*Первое направление* связано с исследованием различных подходов к сегментации ГСИ на основе алгоритмов кластеризации в условиях неопределенности, генетических алгоритмов и нейронных сетей. Оно предусматривает изучение вопросов нечеткой кластеризации ГСИ, исследование применимости генетических алгоритмов для решения этой задачи и алгоритмов уточнения результатов кластеризации на базе искусственных нейронных сетей.

*Второе направление* основано на идее сегментации объектов на ГСИ с использованием ансамбля алгоритмов кластеризации, обеспечивающего повышение надежности решения задачи сегментации. Здесь основным для исследования вопросом является анализ подходов к формированию кластерного ансамбля с использованием меток кластеров. Другим важным вопросом является изучение подходов к формированию кластерного ансамбля, основанных на применении генетических алгоритмов с целью максимизации количества взаимной информации и на использовании консолидированной матрицы подобия векторов меток кластеров.

*Третьим важным направлением* является реализация и экспериментальное исследование программных средств сегментации объектов на ГСИ с привлечением материалов гиперспектральной съемки от различных зарубежных и отечественных систем наблюдения Земли. Основными вопросами здесь являются проектирование информационных технологий сегментации, формирование баз данных эталонных объектов и экспериментальные исследования качества функционирования предложенных алгоритмов.

Решению этих вопросов посвящено основное содержание диссертации.

*В главе 2 рассмотрены различные подходы к сегментации гиперспектральных изображений на основе алгоритмов нечеткой кластеризации, генетических алгоритмов и искусственных нейронных сетей.*

В этой главе исследованы достоинства и недостатки FCM-, PCM- и PFCM-алгоритмов, представляющих собой алгоритмы кластеризации объектов в условиях неопределенности. Как известно, FCM-, PCM- и PFCM-алгоритмы основаны на минимизации соответственно целевых функций:

$$J(U, V) = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^n u_j(x_i)^m \cdot d_{ji}^2; \quad (1)$$

$$J(W, V) = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^n w_j(x_i)^m \cdot d_{ji}^2 + \sum_{j=1}^c \eta_j^2 \cdot \sum_{i=1}^n (1 - w_j(x_i))^m; \quad (2)$$

$$J(U, W, V) = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^n (u_j(x_i)^m + w_j(x_i)^{m'}) \cdot d_{ji}^2, \quad (3)$$

где  $U = [u_j(x_i)]$  – нечеткое  $c$ -разбиение множества объектов  $X$  на основе функций принадлежности  $u_j(x_i)$ , определяющих нечеткую степень принадлежности объекта  $x_i$  кластеру  $X_j$ ;  $W = [w_j(x_i)]$  – возможностное  $c$ -разбиение множества объектов  $X$  на основе функций типичности  $w_j(x_i)$ , определяющих возможностную степень типичности объекта  $x_i$  кластеру  $X_j$ ;  $V = (v_1, \dots, v_c)$  –

центры кластеров;  $d_{ji}$  – расстояние между центром кластера  $v_j$  и объектом  $x_i$ :

$d_{ji}^2 = \sum_{l=1}^q (x_i^l - v_j^l)^2$ ;  $m$  и  $m'$  – фаззификаторы ( $m, m' \in R$ ;  $m > 1$ );  $c$  – количество

кластеров  $X_j$  ( $j = \overline{1, c}$ ), которое считается предварительно заданным;  $\eta_j$  ( $j = \overline{1, c}$ ) – «ширина зоны», определяющая расстояние, на котором значение функции типичности объекта  $j$ -у кластеру равно 0,5:

$\eta_j = (\sum_{i=1}^n (u_j(x_i)^m \cdot d_{ji}^2) / \sum_{i=1}^n u_j(x_i)^m)^{0,5}$ ;  $n$  – количество объектов кластеризации;  $q$  –

количество характеристик;  $x_i^l$  –  $l$ -я характеристика  $i$ -го объекта;  $v_j^l$  –  $l$ -я координата центра  $j$ -го кластера;  $j = \overline{1, c}$ ;  $i = \overline{1, n}$ ;  $l = \overline{1, q}$ .

Эти алгоритмы основаны на различных подходах к формированию кластеров: FCM-алгоритм реализует объединение объектов с учетом свойства кластерной относительности; PCM-алгоритм – с учетом свойства кластерной типичности, а PFCM-алгоритм одновременно учитывает свойства кластерной относительности и кластерной типичности. Как показывает анализ, для гиперспектральной информации характерна неопределенность при определении принципов отнесения объектов к кластерам.

Функции принадлежности и типичности определяются соответственно как

$$u_j(x_i) = 1 / \sum_{k=1}^c (d_{ji} / d_{ki})^{2/(m-1)} ; \quad (4)$$

$$w_j(x_i) = 1 / (1 + (d_{ji} / \eta_j)^{2/(m-1)}) . \quad (5)$$

При этом  $\sum_{j=1}^c u_j(x_i) = 1$  ( $i = \overline{1, n}$ );  $\sum_{i=1}^n w_j(x_i) = 1$  ( $j = \overline{1, c}$ ).

Показано, что для получения адекватных результатов кластеризации ГСИ с применением FCM-, PCM- и PFCM-алгоритмов необходимо осуществить их многократное выполнение для различных исходных разбиений при фиксированном количестве кластеров  $c$ , выполнить сравнение значений целевой функции и выбрать для дальнейшего анализа разбиение с ее минимальным значением.

Разработаны алгоритмы кластеризации ГСИ, реализующие совместное выполнение FCM-алгоритма (PCM-алгоритма или PFCM-алгоритма) и генетического алгоритма, основанные на учете свойства кластерной относительности объектов (и/или свойства кластерной типичности). В качестве адекватного эталонного результата использовалось решение, принятое человеком.

Экспериментально показано, что использование комбинаций алгоритмов позволяет по ГСИ сформировать адекватные субоптимальные результаты кластеризации объектов, близкие по качеству с теми, которые получаются человеком-оператором. При этом была использована информация от зарубежных и отечественных гиперспектрометров: Hyperion, AVIRIS, HYDICE, «Сокол-ГЦП». Установлено, что вероятность ложной идентификации элементов ГСИ состав-



ляет в среднем по указанной аппаратуре порядка 12,4 %. В качестве эталонных данных использовались результаты сегментации человеком. На рис. 1 представлен пример сегментации данных от ГСА AVRIS с использованием комбинации FCM-алгоритма и генетического алгоритма, в которой доля ложных идентификаций составила 10,8% (слева исходный снимок, справа – результат).

Для всех разработанных алгоритмов сегментации реализован способ кодирования хромосом, реализующий их представление с помощью координат центров кластеров. Показано, что при сегментации ГСИ данный способ имеет явные преимущества по сравнению с кодированием хромосом с помощью степеней принадлежности объектов центрам кластеров. Для решения проблемы преждевременной сходимости популяции предложен подход, основанный на использовании островной модели генетических алгоритмов. При реализации такой модели применительно к ГСИ обосновано использование вместо большой популяции (размером 40 – 60 хромосом) нескольких подпопуляций меньшего размера, например 4 – 6 популяций размером 10 хромосом.



Рис. 1. Пример сегментации объектов на ГСИ с использованием сочетания FCM-алгоритма и генетического алгоритма

Разработана островная модель генетических алгоритмов, позволяющая снизить риск попадания функций соответствия генетических алгоритмов в локальные минимумы. Даны рекомендации по выбору параметров островной модели.

Спроектированы алгоритмы уточнения результатов сегментации, основанные на применении искусственных нейронных сетей. Обоснована целесообразность использования двух- и трехслойной нейронных сетей. Даны рекомендации по выбору доли объектов, извлекаемых из уже имеющихся результатов сегментации и используемых при формировании обучающей выборки.

Выполнены детальные исследования комбинированного использования FCM-, РСМ- и PFCM-алгоритмов, генетического алгоритма, островных моделей и искусственных нейронных сетей с привлечением информации от гиперспек-

тральной аппаратуры AVRIS (в качестве выборки использовались 12 гиперкубов). Установлено, что доля ложных идентификаций элементов ГСИ составила 9,2%.

*В главе 3 рассмотрены подходы к сегментации ГСИ с применением ансамбля алгоритмов сегментации на основе использования меток кластеров, генетических алгоритмов и консолидированной матрицы подобия векторов меток кластеров.*

Каждый из рассмотренных в главе 2 алгоритмов сегментации реализует разбиение гиперспектрального изображения на отдельные образования и не всегда обеспечивает учет всего многообразия скрытых связей между элементами ГСИ. В связи с этим сформулирована задача консолидации результатов сегментации ГСИ, полученных с применением различных частных алгоритмов кластеризации.

Разработан ансамбль алгоритмов кластеризации, основанный на применении генетического алгоритма для максимизации количества взаимной информации и обеспечивающий получение консолидированного вектора меток кластеров. Генетический алгоритм обеспечивает поиск оптимального консолидирующего результата сегментации, так называемого вектора меток кластеров, и максимизацию целевой функции на основе оценки взаимной информации.

В результате применения  $R$  частных алгоритмов сегментации ГСИ формируется  $R$  векторов меток кластеров. При этом каждый  $r$ -й частный алгоритм сегментации дает разбиение на  $c^r$  кластеров ( $r = \overline{1, R}$ ), описываемое вектором меток кластеров  $\lambda^r$ . Функция  $\Gamma$ , реализующая отображение  $N^{n \times R} \rightarrow N$  частных решений о результатах сегментации в одно консолидированное решение, определяется как

$$\Gamma: \{\lambda^r \mid r \in \{1, \dots, R\}\} \rightarrow \lambda. \quad (6)$$

При отсутствии априорной информации об относительной значимости того или иного частного решения функция  $\Gamma$  определяется из условия максимального использования информации из частных решений. Для этого применена функция нормализованной взаимной информации (normalized mutual information (NMI)):

$$\phi^{NMI}(\lambda^a, \lambda^b) = \frac{\sum_{h=1}^{c^a} \sum_{l=1}^{c^b} \left[ n_{hl} \cdot \log \left( \frac{n \cdot n_{hl}}{n_h^a \cdot n_l^b} \right) \right]}{\sqrt{\left( \sum_{h=1}^{c^a} n_h^a \cdot \log \left( \frac{n_h^a}{n} \right) \right) \cdot \left( \sum_{l=1}^{c^b} n_l^b \cdot \log \left( \frac{n_l^b}{n} \right) \right)}}, \quad (7)$$

где  $\lambda^a$  и  $\lambda^b$  – вектора меток кластеров;  $n_h^a$  и  $n_l^b$  – количество объектов в  $h$ -м и  $l$ -м кластерах;  $n_{hl}$  – количество объектов, которые в  $h$ -м кластере соответствуют меткам из вектора меток кластеров  $\lambda^a$  так же, как в  $l$ -м кластере соответствуют меткам из вектора меток кластеров  $\lambda^b$ .

Средняя нормализованная взаимная информация (average  $NMI - (ANMI)$ ) для множества  $A$  частных решений о результатах сегментации и консолидированного вектора меток кластеров  $\hat{\lambda}$  определена как

$$\varphi^{ANMI}(A, \hat{\lambda}) = \frac{1}{R} \cdot \sum_{r=1}^R \varphi^{NMI}(\tilde{\lambda}, \lambda^r). \quad (8)$$

С учетом этого разработан алгоритм повышения точности сегментации гиперспектральных изображений за счет обобщенного анализа результатов нечеткой кластеризации на основе формирования консолидированной матрицы подобия меток кластеров.

При формировании начальной популяции хромосом обосновано использование векторов меток кластеров, полученных в результате реализации частных алгоритмов сегментации и уточнения их результатов с применением искусственных нейронных сетей. При этом для конкретного гиперспектрального изображения вычисление весовых коэффициентов частных алгоритмов кластеризации основано на оценке количества однозначно классифицируемых объектов.

Спроектирован алгоритм разбиения графа, соответствующего матрице подобия, за счет применения спектральной фильтрации и алгоритма нечетких  $c$ -средних. Алгоритм реализуется следующей последовательностью шагов.

*Шаг 1.* Консолидированная матрица подобия  $S$  векторов меток кластеров приводится к виду дважды стохастической матрицы  $\tilde{S}$  (матрица стоимости графа  $G = (V, E)$  со множеством вершин  $V$  и множеством ребер  $E$ ).

*Шаг 2.* Для заданного количества кластеров  $c = \max_{r=1, R}(c^r)$  на основе матрицы  $\tilde{S}$  определяются  $c$  собственных векторов  $v_k$  ( $k = \overline{1, c}$ ), состоящих из  $n$  элементов (по количеству объектов ГСИ). Каждая  $i$ -я ( $i = \overline{1, n}$ ) координата  $k$ -го ( $k = \overline{1, c}$ ) собственного вектора  $v_k$  ( $k = \overline{1, c}$ ) участвует в формировании нового объекта  $Y_i$  с вектором координат  $\tilde{v}_i = (v_{i1}, \dots, v_{ic})$  ( $i = \overline{1, n}$ ).

*Шаг 3.* Для кластеризации объектов  $Y_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) используется алгоритм нечетких  $c$ -средних (FCM-алгоритм). Полученные при этом метки кластеров формируют искомый консолидированный вектор меток кластеров  $\hat{\lambda}$ .

*Шаг 4.* Стоимость  $Cost$  разбиения графа  $G = (V, E)$  на заданное количество кластеров  $c$  вычисляется как

$$Cost = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{s}_{ij} - tr(P^T \cdot \tilde{S} \cdot P), \quad (9)$$

где « $tr$ » – операция вычисления следа матрицы  $P^T \cdot \tilde{S} \cdot P$ ;  $\tilde{S}$  – матрица стоимости графа размером  $n \times n$ ;  $P$  – разреженная матрица размером  $n \times c$ .

Экспериментальные исследования на реальных данных гиперспектральной съемки показали, что использование для кластеризации ансамбля различных алгоритмов сегментации повышает долю верно кластеризируемых элемен-

тов на 5-7%. Этот показатель является усредненным по всем рассмотренным вариантам использования ансамбля алгоритмов кластеризации. На рис. 2 в качестве примера слева представлен результат сегментации ГСИ от датчика AV-RIS с использованием PFCM-алгоритма (доля ложных идентификаций – 8,9 %), а справа – с использованием ансамбля алгоритмов (доля ложных идентификаций – 5,6%).

*В главе 4 рассматриваются практическая реализация и экспериментальные исследования системы сегментации объектов по данным гиперспектральной съемки.*

Во-первых, представлены структурные решения комплекса обработки данных ГСА, установленной на космическом аппарате «Ресурс-П» (головной разработчик системы – Ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс», разработчик ГСА – Красногорский завод им. С.А. Зверева). Этот комплекс включает в себя 4 автоматизированных рабочих места, в числе которых комплекс тематической обработки, где программно реализованы алгоритмы сегментации ГСИ, рассмотренные в главах 2 и 3.

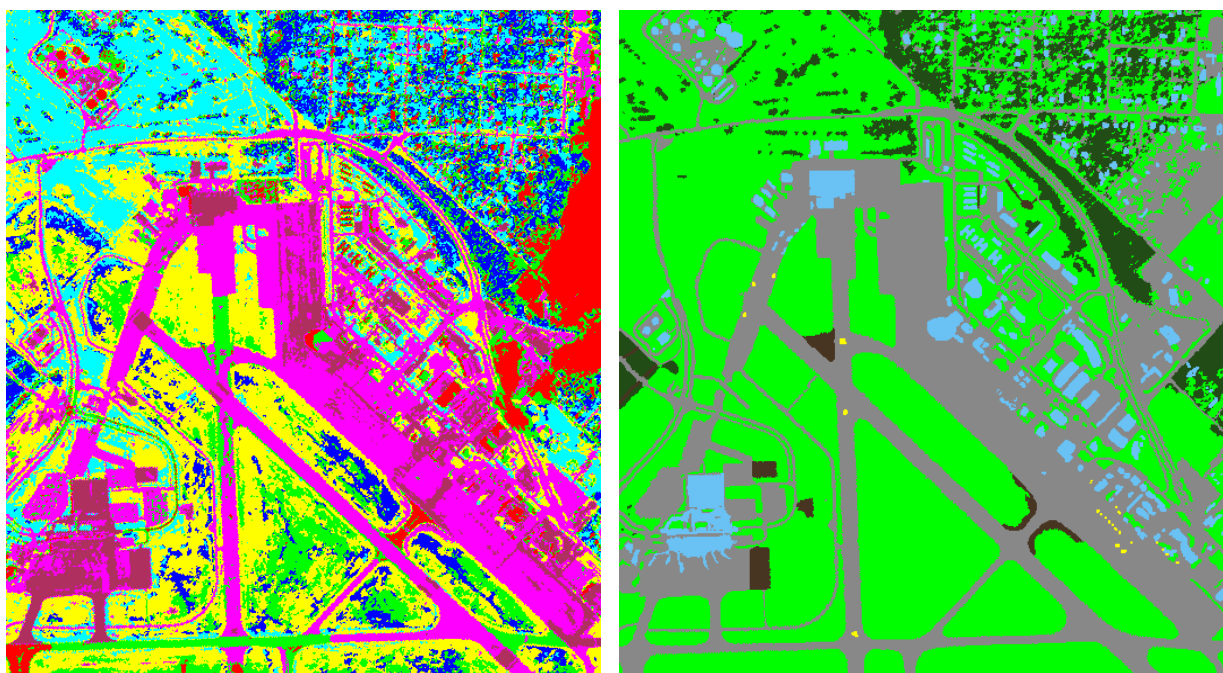


Рис. 2. Результаты сегментации ГСИ с использованием PFCM-алгоритма и ансамбля алгоритмов

Этот комплекс прошел все виды проверок и подготовлен к летным испытаниям спутника «Ресурс-П», запуск которого намечен на июнь – июль 2013г. На базе этого комплекса проведены экспериментальные исследования предложенных в диссертации алгоритмов. Для испытания привлекались снимки от гиперспектральной аппаратуры отечественного и зарубежного производства как космического, так и авиационного базирования. В табл. 1 представлены свод-

ные результаты этих исследований в виде доли ложных идентификаций объектов (в процентах), усредненные по нескольким гиперкубам.

Таблица 1. Результаты исследований алгоритмов идентификации ГСА

Экспериментальный материал	FCM-алгоритм	PCM-алгоритм	PFCM-алгоритм	Ансамбль алгоритмов
5 гиперкубов от ГСА «Сокол»	12,4	15,7	9,2	4,3
6 гиперкубов от ГСА AVRIS	13,1	16,9	8,9	5,6
8 гиперкубов от ГСА Hyperion	12,7	16,1	10,1	4,9

Во-вторых, для решения задачи классификации объектов по ГСИ выполнена разработка технологии формирования базы эталонных спектральных характеристик (БД СХ) объектов земной поверхности. Основу этой базы составили наборы спектральных характеристик, переданные Военно-космической академией им. А.Ф. Можайского. Рассмотрены варианты создания БД СХ, обоснована реляционная модель их построения. На рис. 3 представлена реляционная структура БД СХ.

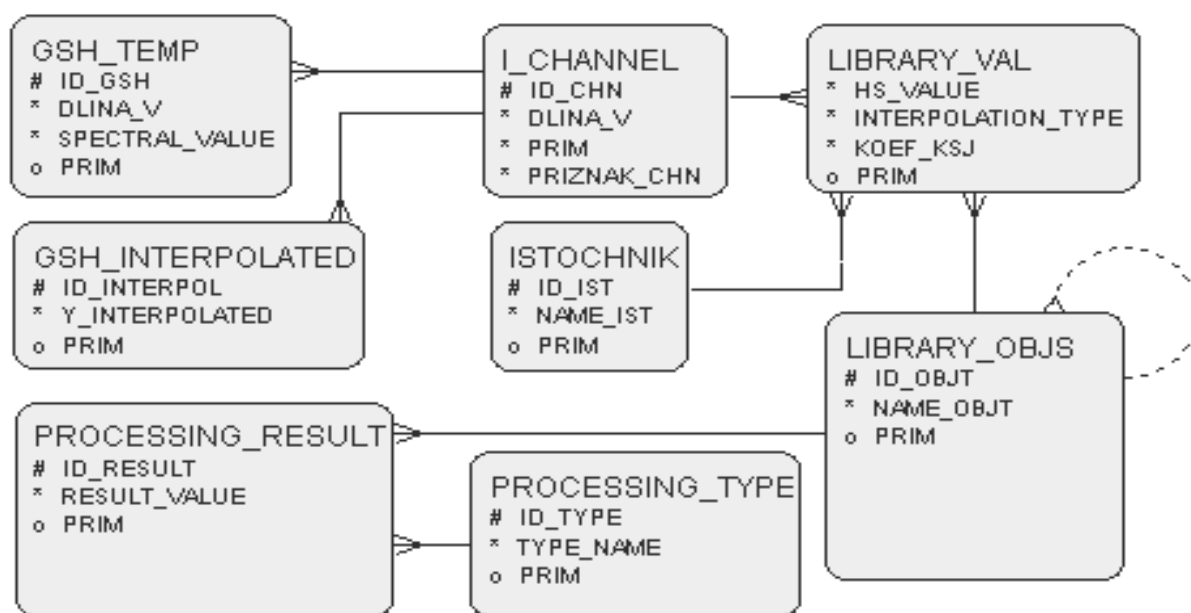


Рис. 3. Реляционная структура БД СХ

В-третьих, для реализации комплекса идентификации объектов по ГСИ обоснована его архитектура типа «клиент-сервер», в которой реализована реляционная модель БД СХ, работающая под управлением СУБД PostgreSQL.

Результаты диссертационных исследований в виде алгоритмов и программных комплексов внедрены в:

- Научном центре оперативного мониторинга Земли Корпорации «Российские космические системы»;

- Институте систем обработки изображений РАН, а также используются в учебном процессе РГРТУ.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Выполнен анализ отечественных и зарубежных систем гиперспектральной съемки Земли. Рассмотрены параметры, принципы построения и функционирования наиболее передовой гиперспектральной аппаратуры. Показано, что это принципиально новый тип аппаратуры, который требует разработки соответствующих методов, алгоритмов и программных средств обработки гиперспектральных данных.

2. По результатам выполненного анализа определена необходимость в проведении научных исследований по трем направлениям: исследование различных подходов к сегментации ГСИ на основе алгоритмов нечеткой кластеризации, генетических алгоритмов и искусственных нейронных сетей; сегментация объектов на ГСИ с использованием ансамбля алгоритмов кластеризации; реализация и экспериментальное исследование предложенных алгоритмов и разработанных программных средств сегментации объектов на ГСИ с привлечением материалов гиперспектральной съемки от различных зарубежных и отечественных систем наблюдения Земли.

3. Разработаны алгоритмы повышения качества сегментации гиперспектральных изображений путем комплексного использования алгоритмов нечеткой кластеризации, генетических алгоритмов и искусственных нейронных сетей.

4. Спроектирован алгоритм субоптимальной сегментации гиперспектральных изображений, основанный на максимизации с помощью генетических алгоритмов совокупной информации, полученной с использованием различных подходов нечеткой кластеризации.

5. Разработан алгоритм повышения точности сегментации гиперспектральных изображений за счет обобщенного анализа результатов нечеткой кластеризации на основе формирования консолидированной матрицы подобия меток кластеров объектов.

6. Предложен алгоритм разбиения графа, соответствующего матрице подобия меток кластеров объектов, основанный на применении спектральной фильтрации и алгоритма нечетких  $c$ -средних.

7. Представлены структурные решения комплекса сегментации и идентификации объектов земной поверхности по ГСИ. Разработана реляционная база данных эталонных спектральных характеристик типовых объектов.



8. Выполнены экспериментальные исследования натурной гиперспектральной информации от отечественных и зарубежных систем наблюдения Земли, получены достоверные оценки точности работы предложенных алгоритмов. Наилучший результат дал ансамбль алгоритмов кластеризации, обеспечивающий долю ложных сегментаций порядка 5 %.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### Статьи в изданиях по списку ВАК

1. Тишкин Р.В., Юдаков А.А. Субпиксельная классификация объектов на космических гиперспектральных изображениях // Цифровая обработка сигналов. 2012. №3. С. 49-51.

2. Еремеев В.В., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Юдаков А.А. Повышение четкости отображения объектов на данных гиперспектральной съемки земной поверхности // Цифровая обработка сигналов. 2012. №3. С.35-39.

3. Ахметов Р.Н., Стратилатов Н.Р., Юдаков А.А., Везенов В.И., Еремеев В.В. Модели формирования и некоторые алгоритмы обработки гиперспектральных изображений // Исследование Земли из космоса. 2013. №4. С. 35-39.

### Статьи в межвузовских сборниках

4. Еремеев В.В., Макаренков А.А., Юдаков А.А. Выделение границ объектов на данных дистанционной гиперспектральной съемки Земли с применением пространственных и частотно-пространственных мер сходства // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. научн. тр. Рязань: РГУ. 2011. Вып. 17. С. 46-49.

5. Нестеров Н.И., Юдаков А.А. Возможностная кластеризация гиперспектральной информации с использованием генетических алгоритмов // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ. 2012. С. 12-14.

6. Макаренков А.А., Юдаков А.А., Ялымов Д.В. Показатели качества выделения объектов на гиперспектральных изображениях земной поверхности // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. научн. тр. Рязань: РГУ. 2012. Вып. 18. С. 48-50.

7. Труханов С.В., Юдаков А.А. Реализация и экспериментальные исследования системы идентификации объектов по данным гиперспектральной съемки // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ. 2012. С. 28-33.

8. Еремеев В.В., Макаренков А.А., Юдаков А.А. Новые технологии автоматического выделения границ объектов на гиперспектральных изображениях земной поверхности // Информационные технологии в научных исследованиях: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ. 2012. С. 56-61.

9. Тишкин Р.В., Шлыков Е.А. Юдаков А.А. Алгоритм нечеткой кластеризации CSIFCM в задаче сегментации гиперспектральных и мультиспектральных изображений // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ. 2012. С. 43-48.

10. Труханов С.В., Юдаков А.А. Классификация объектов гиперспектральных изображений в условиях неопределенности // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ. 2012. С. 58-64.

11. Тишкин Р.В., Юдаков А.А. Сегментация гиперспектральных изображений с применением алгоритмов кластеризации в условиях неопределенности, генетических алгоритмов и нейронных сетей // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ. 2013. С. 124-138.

12. Демидова Л.А., Юдаков А.А. Сегментация гиперспектральных изображений с применением ансамбля алгоритмов кластеризации // Программные информационные системы : межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ. 2013. С. 33-49.

*Тезисы докладов на международных и всероссийских конференциях*

13. Юдаков А.А. Новые направления работ по анализу космических гиперспектральных снимков поверхности Земли // Тез. докл. XVI всерос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях». Рязань: РГРТУ. 2011. С. 237-238.

14. Антонушкина С.В., Еремеев В.В., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Юдаков А.А. Новые возможности анализа объектов земной поверхности на основе гиперспектральной съемки // Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космической техники». Самара: СамНЦ РАН. 2011. С. 26-27.

15. Труханов С.В., Юдаков А.А. Идентификация объектов земной поверхности по гиперспектральным снимкам // Тез. докл. 17-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТУ. 2012. С. 33-34.

16. Юдаков А.А. Коррекция атмосферных искажений на данных гиперспектральной съемки Земли // Тез. докл. 17-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТУ. 2012. С. 48-49.

17. Еремеев В.В., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Юдаков А.А. Вопросы анализа гиперспектральных изображений и их комплексирования с материалами спектральной съемки // Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф.



«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: Институт космических исследований РАН. 2011.

18. Юдаков А.А. Оценка качества сегментации гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли // Тез. докл. 17-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТУ. 2012. С. 61-62.

19. Тишкин Р.В., Юдаков А.А., Ялымов Д.В. Спектральные разностные меры для автоматической четкой классификации гиперспектральных изображений поверхности Земли // Тез. докл. XVII всерос. научн.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях». Рязань: РГРТУ. 2012. С. 181-182.

20. Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Юдаков А.А. Технологии комплексирования данных гиперспектральной съемки Земли с информацией от других съемочных систем // Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: Институт космических исследований РАН. 2012.

21. Нестеров Н.И., Тишкин Р.В., Юдаков А.А. Кластеризация гиперспектральной информации на основе инструментария теории нечетких множеств // Тез. докл. XVII всерос. научн.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях». Рязань: РГРТУ. 2012. С. 184-185.

22. Макаренков А.А., Юдаков А.А. Статистическая коррекция атмосферных искажений на гиперспектральных спутниковых снимках земной поверхности // Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». М.: Корпорация «Российские космические системы». 2012. С. 54-55.

23. Нестеров Н.И., Тишкин Р.В., Юдаков А.А. Использование эволюционных вычислений для повышения качества сегментации изображений земной поверхности // Тез. докл. XVII всерос. научн.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях». Рязань: РГРТУ. 2012. С. 185-186.

24. Ахметов Р.Н., Везенов В.И., Еремеев В.В., Стратилатов Н.Р., Юдаков А.А. Основные направления исследований по созданию технологий обработки данных гиперспектральной съемки Земли // Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. «Гиперспектральные приборы и технологии». Красногорск. 2013. С. 23-25.

25. Труханов С.В., Юдаков А.А. Формирование базы данных спектральных эталонов // Тез. докл. XVII всерос. научн.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях». Рязань: РГРТУ. 2012. С. 43-44.

26. Тишкин Р.В., Юдаков А.А. Классификация объектов земной поверхности по данным гиперспектральной съемки на основе методов искусственного интеллекта // Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. «Гиперспектральные приборы и технологии». Красногорск. 2013. С. 109-110.

27. Юдаков А.А. Кластеризация гиперспектральных изображений земной поверхности с использованием искусственной нейронной сети // Тез. докл. XVII всерос. научн.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях». Рязань: РГРТУ. 2012. С. 55-56.

Свидетельства о регистрации программ

28. Труханов С.В., Юдаков А.А. Программа интеллектуальной обработки данных гиперспектральной съемки. М.: ОФАП. 2012 (свидетельство о регистрации № 2013610619 от 04.12.2012).

29. Труханов С.В., Юдаков А.А. Создание структуры базы данных системы интеллектуальной обработки материалов гиперспектральной съемки. М.: ОФАП. 2012 (свидетельство о регистрации № 2013611036 от 28.11.2012).

**Юдаков Антон Александрович**

**АЛГОРИТМЫ СЕГМЕНТАЦИИ  
ОБЪЕКТОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ПО ДАННЫМ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ**

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Бумага офисная. Печать цифровая.  
Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.  
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.