

*На правах рукописи*



**ТРУХАНОВ Сергей Викторович**

**АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ  
ПО ДАННЫМ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ЗЕМЛИ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ**

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

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

**Рязань 2016**

Работа выполнена в Рязанском государственном  
радиотехническом университете (РГРТУ)

Научный руководитель: **Тишкин Роман Валентинович**  
кандидат технических наук, начальник отдела  
филиала АО «Ракетно - космический центр  
«Прогресс» - ОКБ «Спектр», г. Рязань

Официальные оппоненты: **Фурсов Владимир Алексеевич**  
доктор технических наук, профессор, заведующий  
кафедрой суперкомпьютеров и общей информатики  
Самарского государственного аэрокосмического  
университета имени академика С.П. Королева  
(национального исследовательского университета)

**Григорьева Ольга Викторовна**  
кандидат технических наук, старший научный  
сотрудник Военно-космической академии имени  
А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: **Научно-производственная корпорация  
«Результаты Космической Деятельности»,  
г. Москва**

Защита состоится **15 июня 2016 года в 12 ч.** на заседании диссертационного совета Д 212.211.01 в Рязанском государственном радиотехническом университете по адресу:

**390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГРТУ и на сайте РГРТУ: <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан

2016 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд. техн. наук, доцент



**Пржегорлинский В.Н.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время в народном хозяйстве и обороне страны возрастает роль космических исследований, связанных с дистанционным зондированием Земли. Приоритетным направлением в этой области сегодня являются технологии, основанные на гиперспектральной космической съемке. При таком способе наблюдения Земли для каждой точки земной поверхности формируется спектральная характеристика, которая описывает зависимость энергии излучения от длины волны. Спектральная характеристика отражает физико-химические свойства объектов наблюдаемой сцены, что позволяет на качественно новой основе решить трудно формализуемую задачу идентификации объектов земной поверхности. Под идентификацией понимается отнесение того или иного наблюдаемого объекта к типу (например, растительность, водная поверхность и др.) и классу внутри типа (например, деревья, травы, пресная вода и др.).

Применение данных гиперспектральной съемки позволяет решать хозяйственные и военно-прикладные задачи (экологический мониторинг окружающей среды; контроль за состоянием водных, лесных, сельскохозяйственных ресурсов; мониторинг животного и растительного мира; геологическая разведка полезных ископаемых и ряд других важных задач).

За рубежом работы в данном направлении начаты 10-12 лет назад и в настоящее время получают интенсивное развитие. В нашей стране в 2012 году впервые был выведен на орбиту космический аппарат МКА-ФКИ (головной разработчик – НПО им. С.А. Лавочкина), у которого в качестве дополнительной нагрузки была размещена аппаратура гиперспектральной съемки. А в 2013 году на орбиту был выведен космический аппарат «Ресурс-П» производства АО «РКЦ «Прогресс» с гиперспектральной аппаратурой на борту. Остро стоит задача создания технологий обработки гиперспектральной информации в интересах решения ряда важных задач для различных отраслей народного хозяйства.

Процесс обработки данных гиперспектральной съемки является весьма сложным и многоэтапным. Обычно вначале решаются вопросы предварительной обработки, в результате чего гиперспектральные данные приобретают свойства измерительной информации, по ней становится возможным оценивать с требуемой точностью спектральные характеристики объектов, привязанные к координатам земной поверхности. Далее решается задача кластеризации (сегментации) гиперспектральных изображений, т. е. их разделение на области с примерно одинаковыми свойствами. Наконец, осуществляется идентификация объектов наблюдаемой сцены. Это весьма сложный и трудно формализуемый процесс, относящийся к разряду «вечно» решаемых. Поэтому любые новые конструктивные решения заслуживают всяческого внимания.

В качестве математической основы для идентификации объектов на гиперспектральных изображениях автор использует аппарат нечеткой линейной регрессии. Такой выбор основан на том, что нечеткая линейная регрессия позволяет провести идентификацию в условиях неоднозначности. Теоретическую основу для решения этого вопроса составляют труды известных ученых,

таких как Л. Заде, Б. Коско, Э. Мамдани, С.Д. Штовба, Н. Lee, Н. Танака и другие. В Рязанском государственном радиотехническом университете глубокие исследования в этом направлении проводятся д-м техн. наук, профессором Демидовой Л.А.

В то же время автор не исключает возможность принятия более эффективных решений.

**Степень разработанности темы.** Признанными лидерами в решении задач обработки гиперспектральных изображений являются зарубежные фирмы ITT VIS и Intergraph Corporation (США). Ими создан ряд программных изделий, таких как ENVI, ERDAS IMAGINE, которые получают широкое коммерческое распространение в мире.

В нашей стране активные исследования в данной области ведут: Самарский ракетно-космический центр «Прогресс» и его филиал в Рязани ОКБ «Спектр», Научно-производственная корпорация «РЕКОД», Красногорский завод им. С.А. Зверева, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Научный центр оперативного мониторинга Земли корпорации «Российские космические системы», Рязанский государственный радиотехнический университет, НПО им. С.А. Лавочкина, ЦНИИмаш, Центр Келдыша, НТЦ уникального приборостроения РАН, МГТУ им. Баумана, НИИ «АЭРОКОСМОС», Институт систем обработки изображений РАН (г. Самара), Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева и др.

Эти организации решают вопросы создания гиперспектральной аппаратуры, методик ее калибровки, алгоритмического и программного обеспечения первичной и целевой обработки. Однако центральная задача – идентификация объектов по гиперспектральным изображениям – далека от завершения.

**Цель диссертации** заключается в создании высокоэффективных алгоритмов идентификации объектов по данным гиперспектральной съемки Земли с использованием аппарата нечеткой линейной регрессии.

Для достижения поставленной цели решаются следующие основные задачи:

- проводится анализ методов идентификации объектов поверхности Земли по данным гиперспектральной съемки;
- разрабатывается алгоритм идентификации на основе нечеткой линейной регрессии;
- создается алгоритм комплексирования различных решений по идентификации объектов наблюдаемой сцены;
- разрабатываются структура базы данных хранения спектральных характеристик, алгоритм и технология идентификации объектов по данным гиперспектральной съемки;

- проводится экспериментальная оценка надежности решения задачи идентификации объектов земной поверхности по данным гиперспектральной съемки при использовании алгоритмов на основе нечеткой линейной регрессии.

**Научная новизна** диссертации определяется тем, что в ней представлены новые эффективные алгоритмы идентификации объектов по данным гиперспектральной съемки Земли с целью повышения надежности идентификационного решения.

**На защиту выносятся следующие новые научные результаты:**

- алгоритм идентификации объектов поверхности Земли по данным гиперспектральной съемки, основанный на использовании нечеткой линейной регрессии, который позволяет повысить надежность решения этой задачи на 6,2 %;

- алгоритм комплексирования результатов различных решений по определению объектов на гиперспектральных изображениях, основанный на рейтинговых оценках и позволяющий повысить надежность идентификации на 7,2 %;

- структура базы данных, основанная на регрессионных моделях спектральных характеристик и позволяющая повысить надежность идентификации объектов;

- алгоритм и технология идентификации объектов по данным гиперспектральной съемки, основанные на их разделении на типы и классы, что позволило ускорить решение этой задачи.

**Практическая ценность** работы состоит в том, что на базе предложенных решений спроектирован программный комплекс обработки гиперспектральной информации космического комплекса «Ресурс-П», внедренный в Научном центре оперативного мониторинга Земли корпорации «Российские космические системы» и в Самарском ракетно-космическом центре «Прогресс».

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 5-и всероссийских и 3-х международных конференциях:

- XV всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании. НИТ-2010» (Рязань, 2010);

- 17-й международной научно-технической конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань, 2012);

- XVII всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях. НИТ-2012» (Рязань, 2012) (2 доклада);

- всероссийской научно-технической конференции «Теоретические и прикладные проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления военного назначения» (ВКА имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 2013);
- 6-й международной научно-технической конференции «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» (Рязань, 2013);
- XX международной открытой научной конференции «Современные проблемы информатизации» (Елм, США, 2015);
- IV всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («IV Козловские чтения», Самара, 2013);
- II всероссийской научно-технической конференции «Теоретические и прикладные проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления военного назначения» (ВКА имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 2015).

**Публикации.** По результатам диссертационных исследований опубликованы 23 работы: 12 статей (3 статьи в изданиях по списку ВАК, 1 статья в издании по списку Scopus), 9 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях, 2 свидетельства о регистрации программ.

**Внедрение результатов работы.** Диссертация выполнена в Рязанском государственном радиотехническом университете. Её результаты в виде алгоритмов и программного обеспечения внедрены в Научном центре оперативного мониторинга Земли корпорации «Российские космические системы», определенном оператором отечественных систем дистанционного зондирования Земли России и в Самарском Ракетно-космическом центре «Прогресс».

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Основной текст работы включает 116 с., 30 рисунков и 17 таблиц. Список литературы из 149 наименований размещен на 15 с. В приложениях приведены результаты экспериментальных исследований, акты о внедрении результатов диссертации и свидетельства о регистрации программ.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*В главе 1 выполнен анализ методов идентификации объектов поверхности Земли по данным гиперспектральной съемки. Рассмотрены принципы построения систем гиперспектральной съемки Земли, известные методы и алгоритмы идентификации объектов земной поверхности по данным от этих систем, обоснованы направления проведения научных исследований на базе теории нечетких множеств.*

По результатам рассмотрения принципов построения систем гиперспектральной съемки Земли, основных характеристик существующей гиперспектральной аппаратуры выявлена тенденция развития отечественных систем, не

уступающих зарубежным аналогам. В связи с этим определена необходимость разработки новых эффективных алгоритмов и программного обеспечения для обработки гиперспектральной информации.

Выполнен анализ методов и алгоритмов идентификации объектов земной поверхности по данным от систем гиперспектральной съемки. Рассмотрены подходы к идентификации с помощью визуальных и автоматизированных методов. Определены понятия гиперспектральной характеристики объекта, спектральной библиотеки. Установлена необходимость создания отечественной спектральной библиотеки. Описаны основные яркостные характеристики изображений, применяемые при решении задач идентификации. Рассмотрены алгоритмы идентификации, базирующиеся на применении известных мер подобия. Установлено, что алгоритмы идентификации, применяющие классические меры подобия, не всегда позволяют получить надежное классификационное решение в случае анализа неоднозначной ситуации, когда исследуемая спектральная характеристика объекта может одновременно принадлежать разным классам (категориям) объектов. Показана целесообразность применения нечетких мер подобия при решении задач идентификации в неоднозначных ситуациях.

Проведено исследование перспектив решения задачи идентификации с использованием алгоритмов интеллектуальной обработки данных Data Mining. Показано сходство алгоритмов Data Mining с алгоритмами идентификации по данным от систем гиперспектральной съемки (использование мер подобия, аппарата теории нечетких множеств), выявлен подход применения аппарата математической статистики, который может быть использован в решении задачи идентификации при моделировании зависимостей гиперспектральных характеристик.

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

*Первое направление* связано с исследованием подходов при идентификации объектов поверхности Земли по данным гиперспектральной съемки на основе нечеткой линейной регрессии. Это направление базируется на применении нечеткой линейной регрессии.

*Второе направление* основано на идее комплексирования результатов различных решений по идентификации объектов гиперспектральных изображений Земли. Это должно обеспечить повышение надежности решения задачи идентификации. Здесь основным вопросом является объединение решений, получаемых с использованием различных алгоритмов.

*Третьим важным направлением* являются реализация и экспериментальные исследования алгоритмов идентификации объектов по данным гиперспектральной съемки с привлечением материалов от систем дистанционного зондирования Земли. Главными вопросами здесь являются разработка структуры базы данных на основе регрессионных моделей спектральных характеристик, создание алгоритма и технологии идентификации объектов, проведение экспериментального исследования качества работы созданных алгоритмов.

**В главе 2** рассмотрены вопросы идентификации объектов поверхности Земли по данным гиперспектральной съемки на основе нечеткой линейной регрессии. Здесь представлены модели нечеткой линейной регрессии, модели спектральных характеристик, алгоритм идентификации с использованием нечетких мер подобия.

Нечеткая линейная регрессия (НЛР) позволяет определять признаки уникальности гиперспектральной характеристики исследуемого объекта.

Предложен алгоритм идентификации объектов поверхности Земли по данным гиперспектральной съемки. В его основу положена идея использования нечеткой линейной регрессии. Процесс идентификации описывается уравнением:

$$Y(x) = A_1 x + A_0, \quad (1)$$

где  $A_1 = \langle a_1, c_1, d_1 \rangle$  и  $A_0 = \langle a_0, c_0, d_0 \rangle$  – треугольные нечеткие числа, соответствующие параметрам  $k$  и  $b$  уравнения классической линейной регрессии (КЛР) ( $y = kx + b$ ). Под *треугольным нечетким числом*  $A$  принято понимать тройку действительных чисел  $\langle a, c, d \rangle$ , ( $c \leq a \leq d$ ), через которые его функция принадлежности  $\mu_A(x)$  определяется как:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} (x - c)/(a - c), & \text{если } x \in [c, a], \\ (x - d)/(a - d), & \text{если } x \in [a, d], \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

Алгоритм идентификации реализуется следующей последовательностью действий.

*Шаг 1.* С помощью решения задачи квадратичного программирования для (1) находятся оптимальные значения параметров  $a_0, c_0, d_0, a_1, c_1, d_1$  из условия:

$$\sum_{j=1}^J (g_j - a_0 - a_1 \cdot \lambda_j)^2 + \sum_{j=1}^J (c_0 + c_1 \cdot \lambda_j + d_1 \cdot \lambda_j) + 0,001 \cdot (c_0^2 + d_0^2 + c_1^2 + d_1^2) \rightarrow \min_{a,c,d} \quad (3)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} a_0 + d_0 + a_1 \cdot \lambda_j + d_1 \cdot \lambda_j &\geq g_j, \\ a_0 - c_0 + a_1 \cdot \lambda_j - c_1 \cdot \lambda_j &\leq g_j, \\ c_0 \geq 0; d_0 \geq 0; c_1 \geq 0; d_1 \geq 0 &(j = \overline{1, J}), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\lambda_j$  – значение длины волны для  $j$ -го канала гиперспектрометра,  $g_j$  – значение коэффициента спектрального отражения для  $\lambda_j$ .

Нахождение минимума в (3) выполняется с помощью функции «quadprog» системы инженерных и научных расчетов MATLAB.



Шаг 2. Для найденного минимального значения определяются характерные точки уравнения классической линейной регрессии  $Y_{НЛР}^{КЛР}$  анализируемой спектральной характеристики:

$$Y_{НЛР}^{КЛР}(\lambda_j) = a_0 + a_1 \cdot \lambda_j. \quad (5)$$

Далее определяются характерные точки уравнений верхней  $Y_{НЛР}^{UP}$  и нижней  $Y_{НЛР}^{LOW}$  границ коридора нечеткой линейной регрессии:

$$Y_{НЛР}^{UP}(\lambda_j) = a_0 + d_0 + (a_1 + d_1) \cdot \lambda_j, \quad (6)$$

$$Y_{НЛР}^{LOW}(\lambda_j) = a_0 - c_0 + (a_1 - c_1) \cdot \lambda_j. \quad (7)$$

На рис. 1 представлена спектральная характеристика в коридоре НЛР:

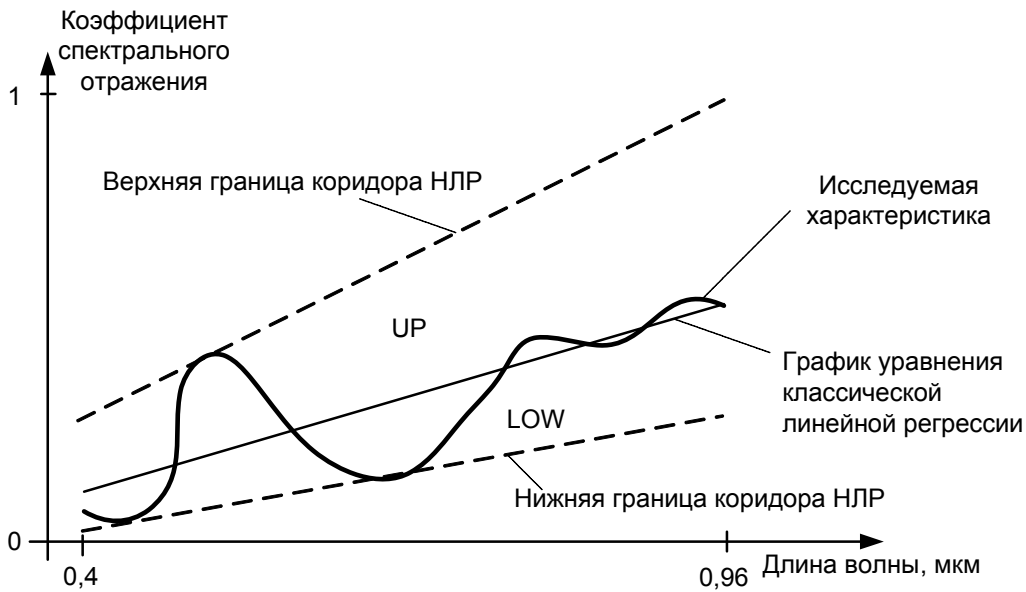


Рис. 1. Представление спектральной характеристики в коридоре НЛР

Точки анализируемой и каждой эталонной характеристик разбиваются на два подмножества, лежащие в верхней  $UP$  и нижней  $LOW$  частях коридора НЛР. После чего для данных точек находятся значения нечетких мер подобия  $F^{UP}$  и  $F^{LOW}$  по одной из двух формул:

$$f_1 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^J |u_A(\lambda_j, g'_j) - u_S(\lambda_j, g''_j)|}{\sum_{j=1}^J (u_A(\lambda_j, g'_j) + u_S(\lambda_j, g''_j))}, \quad (8)$$

$$f_2 = \frac{1}{J} \cdot \sum_{j=1}^J \frac{\min(u_A(\lambda_j, g'_j), u_S(\lambda_j, g''_j))}{\max(u_A(\lambda_j, g'_j), u_S(\lambda_j, g''_j))}, \quad (9)$$

где  $u_A(\lambda_j, g'_j)$  — значение функции принадлежности точек анализируемой спектральной характеристики уравнению НЛР этой характеристики;  $u_S(\lambda_j, g''_j)$  —

значение функции принадлежности точек эталонной спектральной характеристики уравнению НЛР этой характеристики.

Значение функции принадлежности некоторой точки  $(\lambda_j, g_j)$  спектральной характеристики её уравнению НЛР определяется следующим образом:

$$u(\lambda_j, g_j) = \begin{cases} 1 - \frac{a_0 + a_1 \cdot \lambda_j - g_j}{c_0 + c_1 \cdot \lambda_j}, & \text{если } a_0 + a_1 \cdot \lambda_j - c_0 - c_1 \cdot \lambda_j \leq g_j \leq a_0 + a_1 \cdot \lambda_j; \\ 1 - \frac{g_j - a_0 - a_1 \cdot \lambda_j}{d_0 + d_1 \cdot \lambda_j}, & \text{если } a_0 + a_1 \cdot \lambda_j \leq g_j \leq a_0 + a_1 \cdot \lambda_j + d_0 + d_1 \cdot \lambda_j; \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (10)$$

где  $a_0, c_0, d_0, a_1, c_1, d_1$  – параметры, вычисленные при решении (3).

*Шаг 3.* Для анализируемой и каждой эталонной характеристик вычисляются значения результирующей нечеткой меры подобия:

$$F = \min (F^{UP}, F^{LOW}). \quad (11)$$

В качестве искомой выбирается эталонная характеристика, имеющая максимальное значение (11).

Выполнены экспериментальные исследования на реальных данных гиперспектральной съемки в объеме 15 снимков, каждый из которых содержал более 100 различных объектов. Установлено, что применение разработанного алгоритма на основе нечетких мер подобия позволило повысить надежность идентификационного решения на 6,2 % по сравнению с применением алгоритмов на основе классических мер подобия.

*В главе 3 рассмотрены вопросы комплексирования результатов различных решений по идентификации объектов гиперспектральных изображений Земли. Предложен ряд эффективных решений, реализующих данный подход.*

Для повышения надежности идентификации предложен алгоритм комплексирования результатов различных решений по идентификации объектов гиперспектральных изображений. В основу такого решения положена идея применения рейтинговых оценок результатов, полученных алгоритмами, основанными на различных подходах к идентификации.

Главными элементами алгоритма являются два конструктивных решения.

Во-первых, комплексирование результатов идентификации, полученных с использованием меры подобия евклидова расстояния  $E$ , угловой меры подобия  $\alpha$ , а также двух нечетких мер подобия  $F_1$  (8) и  $F_2$  (9) посредством применения формулы

$$\bar{R}^k = \frac{1}{4} (R_E^k + R_\alpha^k + R_{F_1}^k + R_{F_2}^k). \quad (12)$$

Здесь  $R_E^k$ ,  $R_\alpha^k$ ,  $R_{F_1}^k$  и  $R_{F_2}^k$  – рейтинговые оценки  $k$ -й эталонной характеристики при использовании алгоритмов идентификации на основе меры подобия евклидова расстояния  $E$ , угловой меры подобия  $\alpha$ , нечетких мер подобия  $F_1$  и  $F_2$  ( $k = \overline{1, K}$ ;  $K$  – количество эталонных характеристик в базе данных).

Во-вторых, упорядочение эталонных спектральных характеристик из базы данных по возрастанию усредненных значений рейтинговых оценок  $\overline{R}^k$ .

Составными частями алгоритма комплексирования являются алгоритмы идентификации на основе меры подобия евклидова расстояния, угловой меры подобия и нечетких мер подобия.

*Алгоритм идентификации на основе меры подобия евклидова расстояния* использует в своей работе формулу

$$E = \sqrt{\sum_{j=1}^J (y_j^A - y_j^S)^2}, \quad (13)$$

где  $y_j^A$  – значение коэффициента спектрального отражения анализируемой спектральной характеристики для  $j$ -го канала гиперспектрометра;  $y_j^S$  – значение коэффициента спектрального отражения эталонной характеристики для  $j$ -го канала гиперспектрометра;  $j = \overline{1, J}$ .

Алгоритм предполагает:

- расчет значений меры подобия евклидова расстояния (13) для анализируемой и эталонных характеристик, хранимых в базе данных;
- упорядочение характеристик по возрастанию вычисленных значений меры подобия;
- выбор в качестве искомой той эталонной характеристики, для которой значение меры подобия (13) является минимальным.

*Алгоритм идентификации на основе угловой меры подобия* использует в своей работе формулу:

$$\alpha = \arccos \frac{G \cdot G'}{|G| \cdot |G'|} = \arccos \frac{\sum_{j=1}^J g_j \cdot g'_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^J g_j^2} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^J (g'_j)^2}}, \quad (14)$$

где  $G$  и  $G'$  – спектры анализируемой и эталонной характеристик;  $g_j$  и  $g'_j$  – значения коэффициента спектрального отражения анализируемой и эталонной характеристик для значения длины волны  $\lambda_j$  ( $j = \overline{1, J}$ ).

Сравниваемые характеристики рассматриваются как векторы, размерность которых равна количеству каналов гиперспектрометра, а угол между ними определяется значением угловой меры подобия (14).

Алгоритм предполагает:

- расчет значений угловой меры подобия (14) для анализируемой и эталонных характеристик, хранимых в базе данных;
- упорядочение характеристик по возрастанию вычисленных значений меры подобия;
- выбор в качестве искомой той эталонной характеристики, для которой значение меры подобия (14) является минимальным.

Алгоритмы идентификации на основе нечетких мер подобия подробно описаны в главе 2 (см. с. 5).

Выполнены экспериментальные исследования с привлечением натурной информации, указанной в главе 2. Установлено, что надежность идентификационного решения с помощью алгоритма комплексирования повысилась на 7,2 % по сравнению с исходными алгоритмами.

*В главе 4 рассмотрены практическая реализация и экспериментальные исследования предложенных алгоритмов идентификации объектов по данным гиперспектральной съемки Земли.*

Предложена структура базы данных, основанная на регрессионных моделях спектральных характеристик. На рис. 2 представлена реляционная модель базы данных.

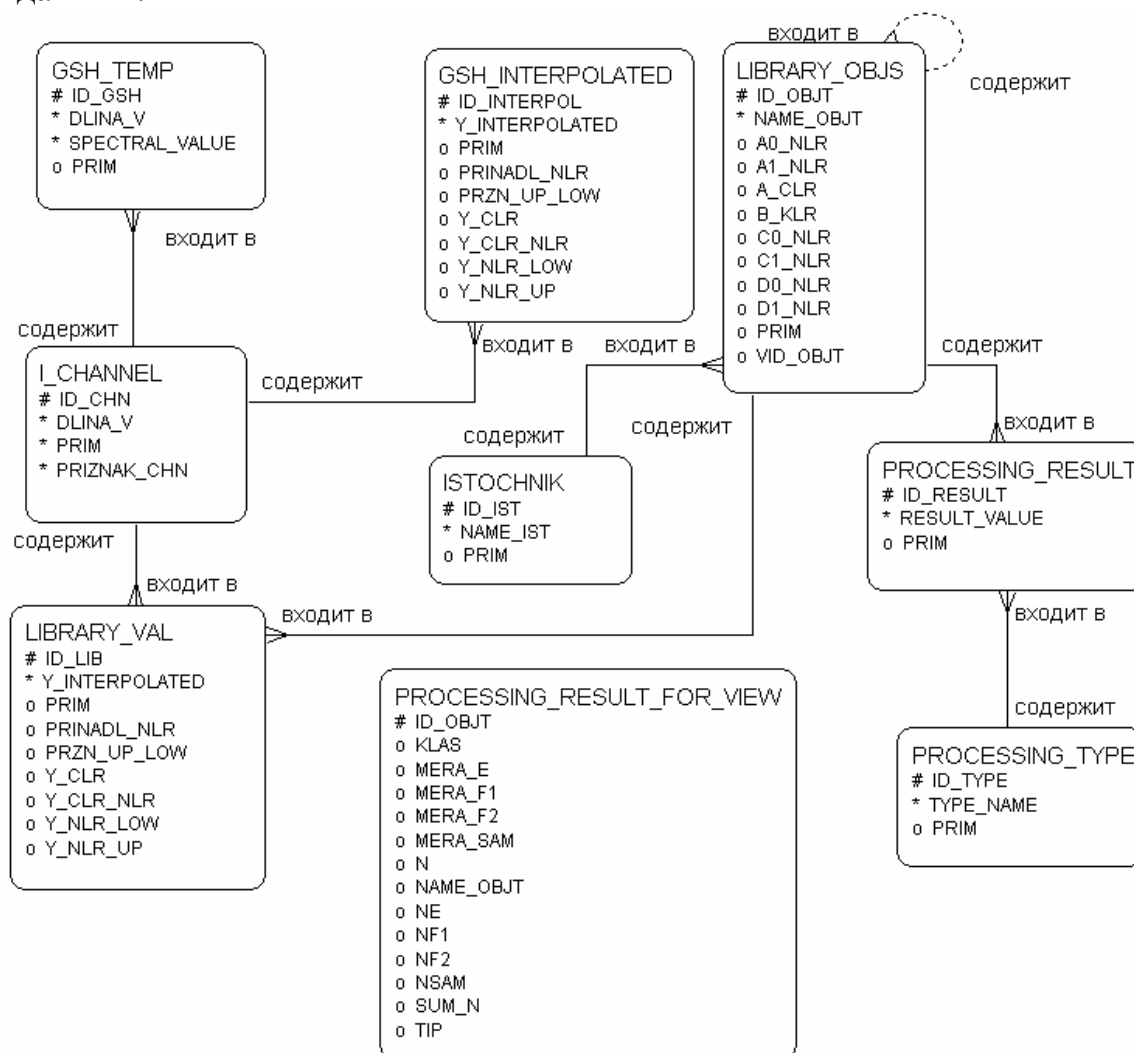


Рис. 2. Реляционная модель базы данных

Отличительной особенностью базы данных является возможность хранения рассчитанных параметров регрессионной модели для каждой эталонной спектральной характеристики, что в совокупности с разработанными алгоритмами позволяет повысить надежность идентификации объектов.

Предложены алгоритм и технология идентификации объектов по данным гиперспектральной съемки, основанные на их разделении на типы и классы.

Алгоритм реализуется следующей последовательностью шагов.

*Шаг 1.* Данные из входной спектральной характеристики заносятся в базу данных с привязкой к набору значений длин волн.

*Шаг 2.* Проводится обрезка входных значений спектральной характеристики по границам волнового диапазона с последующей интерполяцией ярких значений для соответствующих длин волн каналов гиперспектрометра.

*Шаг 3.* С помощью хранимых процедур базы данных выполняется расчет значений мер подобия для каждой эталонной характеристики по отношению к входной характеристике.

*Шаг 4.* Результаты идентификации в виде наборов рейтинговых оценок отдельных алгоритмов сохраняются в базе данных.

*Шаг 5.* С помощью алгоритма комплексирования проводится объединение результатов идентификации.

*Шаг 6.* При необходимости выполняется сохранение интерполированных значений исследуемой характеристики как нового эталона в базе данных с присвоением типа и класса объекта земной поверхности. Также для данной характеристики сохраняются рассчитанные значения регрессионной модели.

Технология идентификации объектов по данным гиперспектральной съемки подразумевает разделение всех объектов на типы и классы. Анализ существующих зарубежных и отечественных спектральных библиотек позволил сформировать классификацию объектов, приведенную в таблице.

#### Классификация объектов земной поверхности

Тип	Класс
Водные поверхности	Морская вода, пресная вода, жидкие смеси, летучие фракции, замороженные фракции
Грунты	Оголенные грунты, почвы, горные породы
Растительность	Деревья, кустарники, разнотравье, мхи, растительные сообщества
Антропогенные объекты	Кровли, основные конструкционные материалы, бетоны, дорожные асфальты и битумы, сельхозугодья

Рассмотренные алгоритм и технология позволяют ускорить принятие окончательного решения при идентификации объекта земной поверхности.

Также в главе представлена программная реализация разработанных алгоритмов.

Проведены экспериментальные исследования по оценке надежности решения задачи идентификации с помощью разработанных алгоритмов на основе данных гиперспектральной съемки космических аппаратов «Ресурс-П» №1 и №2. Исследования показали повышение надежности на 10,9 % по сравнению с алгоритмом спектрального угла, реализованном в существующем программном обеспечении (программное изделие ENVI).

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Рассмотрены принципы построения систем гиперспектральной съемки. Выявлена тенденция развития отечественных систем, для которых требуется разработка новых алгоритмов и программного обеспечения обработки гиперспектральной информации.

2. Выполнен анализ методов и алгоритмов идентификации объектов земной поверхности по данным от систем гиперспектральной съемки. По результатам анализа определена необходимость в проведении научных исследований по трем направлениям: исследование различных подходов при идентификации объектов поверхности Земли по данным гиперспектральной съемки на основе нечеткой линейной регрессии; комплексирование результатов различных решений по идентификации; реализация и экспериментальные исследования алгоритмов идентификации с привлечением материалов от систем дистанционного зондирования Земли.

3. Разработан алгоритм идентификации объектов земной поверхности с использованием нечетких мер подобия на основе аппарата нечеткой линейной регрессии. Данный подход, использовавшийся ранее при решении задач аппроксимации и оценке уникальности фрагментов электронной карты, впервые применяется для идентификации гиперспектральных характеристик объектов. Алгоритм определяет параметры уравнения нечеткой линейной регрессии, строит регрессионную модель характеристики и на основе полученной модели вычисляет результирующие значения нечеткой меры подобия для спектральной характеристики объекта и эталонов, участвующих в идентификации. Проведено исследование надежности алгоритма. На достаточно представительном статистическом материале показано, что алгоритм обеспечивает повышение надежности идентификации объектов на 6,2 % по сравнению с алгоритмами на основе классических мер подобия.

4. Для повышения надежности идентификации предложен алгоритм комплексирования результатов различных решений по идентификации объектов гиперспектральных изображений. В основу такого решения положена идея применения рейтинговых оценок результатов, полученных алгоритмами, основанными на различных подходах к идентификации. Выполнены экспериментальные исследования. Установлено, что надежность идентификационного решения с помощью алгоритма комплексирования повысилась 7,2 % по сравнению с исходными алгоритмами.

5. Разработана структура базы данных, основанная на регрессионных моделях спектральных характеристик. Отличительной особенностью базы данных является возможность хранения рассчитанных параметров регрессионной модели для каждой эталонной спектральной характеристики, что в совокупности с разработанными алгоритмами позволяет повысить надежность идентификации объектов.

6. Разработаны алгоритм и технология идентификации объектов по данным гиперспектральной съемки, основанные на их разделении на типы и классы, что позволило ускорить решение этой задачи. Представлена программная реализация разработанных алгоритмов. Проведены экспериментальные исследования по оценке надежности решения задачи идентификации с помощью разработанных алгоритмов на основе данных гиперспектральной съемки. Исследования показали повышение надежности на 10,9 % по сравнению с алгоритмом спектрального угла, реализованном в существующем программном обеспечении (программное изделие ENVI).

7. Предложенные решения в виде алгоритмов и программного обеспечения внедрены в Научном центре оперативного мониторинга Земли корпорации «Российские космические системы», определенном Оператором отечественных систем дистанционного зондирования Земли России, в Самарском ракетно-космическом центре «Прогресс» и используются для обработки гиперспектральной информации от космических аппаратов серии "Ресурс-П".

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### Статьи в изданиях по списку ВАК

1. Пылькин А.Н., Тишкин Р.В., Труханов С.В. Задачи DATA MINING и их решение в современных реляционных СУБД // Вестник РГРТУ. – Рязань. – №4 (выпуск 38). Рязань, 2011. – С. 60-65.

2. Демидова Л.А., Тишкин Р.В., Труханов С.В. Решение задачи идентификации гиперспектральных характеристик объектов с использованием системы интеллектуальной обработки данных гиперспектральной съемки //

Вестник РГРТУ. – №1 (выпуск 47). – Рязань, 2014. – С. 10-18.

3. Демидова Л.А., Тишкин Р.В., Труханов С.В. Алгоритмы идентификации гиперспектральных характеристик объектов в задачах дистанционного зондирования Земли // Цифровая обработка сигналов. – №3. – 2014 – С. 30-37.

Статьи в изданиях по списку Scopus

4. Demidova L., Trukhanov S. Objects Hyperspectral Features Identification on the Base of Fuzzy Linear Regression and Fuzzy Similarity Measures // Contemporary Engineering Sciences. – Vol. 8 – no.19. – 2015. – P. 885-900.

Статьи в других изданиях

5. Труханов С.В. Интеллектуальный анализ данных в современных СУБД // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр.; под ред. А.Н. Пылькина. – Рязань: РГРТУ, 2010. – С. 38 – 40.

6. Труханов С.В. Повышение надежности базы данных путем организации кластерной системы // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр.; под ред. А.Н. Пылькина. – Рязань: РГРТУ, 2011. – С.149-154.

7. Труханов С.В., Юдаков А.А. Классификация объектов гиперспектральных изображений в условиях неопределенности // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр.; под ред. А.Н. Пылькина. – Рязань: РГРТУ, декабрь 2012. – С.212-213.

8. 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.; под ред. А.Н. Пылькина. – Рязань: РГРТУ, декабрь 2012. – С.100-102.

9. Пылькин А.Н., Тишкин Р.В., Труханов С.В. Реализация системы идентификации гиперспектральных характеристик объектов в СУБД PostgreSQL // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр.; под ред. А.Н. Пылькина. – Рязань: РГРТУ, 2011. – С.87-91.

10. Труханов С.В., Пылькин А.Н. Система простого резервирования и восстановления баз данных под управлением СУБД ORACLE // Наука и технологии. – Т.2. – Краткие сообщения XXX Российской школы, посвященной 65-летию Победы (15-17 июня 2010 года, г. Миасс). – С.47-49.



11. Труханов С.В. Решение задачи квадратичного программирования при идентификации объектов земной поверхности по данным гиперспектральной съемки // Методы и средства обработки и хранения информации: Межвуз. сб. науч. тр.; под ред. В.К. Злобина. – Рязань: РГРТУ, 2014. – С.174-179.

12. Демидова Л.А., Труханов С.В. Алгоритмы поддержки процесса классификации данных гиперспектральной съемки // Электронный журнал Cloud of Science. <http://cloudofscience.ru>, 2015. – Т.2 – №1. – С.40-60.

*Тезисы докладов на Международных и Всероссийских конференциях*

13. Труханов С.В., Юдаков А.А. Формирование базы данных спектральных эталонов // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XVII всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань: РГРТУ, 2012. – С. 192–193.

14. Труханов С.В. Использование нечеткой линейной регрессии в системе интеллектуальной обработки данных космической съемки // 6-я международная научно-техническая конференция «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика»: тезисы докладов – Рязань: РГРТУ, 2013. – С. 276-279.

15. Труханов С.В. Классификация объектов на гиперспектральных изображениях в условиях нечетких множеств // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XVII всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань: РГРТУ, 2012. – С.190-191.

16. Труханов С.В. Применение нечеткой линейной регрессии при идентификации гиперспектральных характеристик объектов // Сборник трудов всероссийской научно-технической конференции «Теоретические и прикладные проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления военного назначения». – Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. – Санкт-Петербург, 2014. – С. 401-406.

17. Труханов С.В., Клыга П.И. Обзор компонентов DATA MINIG современных СУБД // XV всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании /. НИТ – 2010»: материалы конференции. – Рязань, 2010. – С. 157-158.

18. Труханов С.В., Юдаков А.А. Идентификация объектов земной поверхности по гиперспектральным снимкам // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: материалы 17-й международной научно-технической конференции. – Рязань: РГРТУ, 2012. –

Ч.1. – С.126-128.

19. Trukhanov S.V. Using fuzzy linear regression in hyperspectral removal data classification algorithms // Modern informatization problems in economics and safety: Proceeding of the XX-th International Open Science Conference. Yelm, WA, USA, January 2015. – P.56-61.

20. Труханов С.В. Алгоритмы идентификации объектов по данным гиперспектральной съемки Земли с использованием нечеткой линейной регрессии // IV всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («IV Козловские чтения»). – Самара: АО «РКЦ «Прогресс». – 2015. – Т1. – С.282-288.

21. Труханов С.В. Определение гиперспектральных характеристик объектов с помощью модифицированного алгоритма спектрального угла на основе комплексирования различных решений по идентификации // Сборник трудов II всероссийской научно-технической конференции «Теоретические и прикладные проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления военного назначения». – Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского. – Санкт-Петербург, 2015 – С. 227.

*Свидетельства о регистрации программ*

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

23. 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).

**Труханов Сергей Викторович**

**АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ  
ПО ДАННЫМ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ЗЕМЛИ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ**

**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.