

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ, РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Журавель Ю.Н., Федосеев А.А.

*Государственный научно-производственный ракетно-космический
центр «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара,*

Самарский научный центр Российской академии наук

Аннотация

Рассматриваются вопросы обработки данных дистанционного зондирования Земли с целью обнаружения и идентификации объектов природного и антропогенного происхождения. Приводятся результаты исследований, проведённых по гиперспектральному снимку территории Самарской области.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спектральная сигнатура, смешанный пиксел, атмосферная коррекция, метод независимых компонент, согласованная фильтрация.

Введение

Применение мульти- и гиперспектральных данных позволяет повысить эффективность обнаружения и распознавания элементов сцены. Эти данные могут использоваться как совместно с информацией о топологии наблюдаемых объектов, так и самостоятельно.

Мультиспектральные изображения начали использоваться в качестве исходных данных для авиационного и космического мониторинга суши и водной поверхности более 50 лет назад. Наличие гиперспектральных данных дистанционного зондирования существенно расширяет круг решаемых тематических задач.

До недавнего момента на орбите находилось всего лишь два КА с экспериментальными гиперспектрометрами на борту: EO-1 (NASA) и PROBA-1 (ESA). Оба они были запущены более 10 лет назад и находятся в завершающей стадии срока активного существования. После продолжительного перерыва работы по космическим гиперспектральным проектам начались сразу в нескольких странах: ALOS-3 (Япония), HypIRI (США), EnMap (Германия), PRISMA (Италия). 25 июня 2013 года осуществлён запуск созданного в ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» по заказу Федерального космического агентства КА «Ресурс-П» №1, оснащённого аппаратурой высокодеталяного, широкозахватного и гиперспектрального наблюдения.

В связи с этим актуальной становится задача освоения существующих и разработки новых методов использования мульти- и гиперспектральной информации с учётом особенностей её получения.

Основные проблемы, возникающие при обработке гиперспектральных данных

Смешанный пиксел

Гиперспектральная аппаратура работает в смежных узких спектральных каналах в пределах окон прозрачности атмосферы, что позволяет строить практически непрерывную кривую спектрального отражения (спектральную сигнатуру) для элементов подстилающей поверхности.

Увеличение числа каналов даёт больший объём информации о сцене, но простое визуальное дешифрирование не позволяет извлечь все сведения, содержащиеся в кубе данных. Поэтому возникает необходимость проведения автоматизированного спектрального анализа, основными методами которого являются классификация и обнаружение объектов интереса.

Проблема спектральной селекции решалась бы значительно проще, если бы все пикселы изображения были «чистыми», т.е. каждый пиксел содержал в себе только один объект или фон. Однако, во-первых, естественные поверхности редко состоят из однородного материала. Во-вторых, суммарное излучение от всех объектов в пределах элемента пространственного разрешения фиксируется аппаратурой как одиночный пиксел изображения. Таким образом, в подавляющем большинстве случаев мы имеем дело с так называемым смешанным пикселом.

Динамику смеси двух и более субстанций в пределах пиксела можно описать линейной и нелинейной моделью [1].

Смешанные пикселы оказывают значительное влияние на дешифрирование изображений. Целочисленные методы классификации смешанных пикселов приводят к ошибкам в определении площадей, т.к. каждый пиксел может быть отнесён только к одному конкретному классу, хотя при низком пространственном разрешении фактически он содержит два и более класса.

Кроме того, смешанный пиксел может оказаться не согласованным ни с одним из эталонов или, напротив, иметь сходство со спектральной сигнатурой другого эталона, который в действительности отсутствует в этом пикселе.

Проблема смешанного пиксела не решается простым улучшением пространственного разрешения, т.к. при этом появляются детали изображения, не регистрируемые ранее, т.е. вводятся новые спектральные классы. Например, на изображении лесопосадки, которое казалось однородным при низкой разрешающей способности, при повышении разрешения можно выделять отдельные деревья разных видов и разнообразные открытые площадки.

Более точные результаты дают методы субпиксельной обработки. Алгоритмы спектрального разделения используют широкий набор математических технологий для определения исходных компонентов смеси и оценки их процентного содержания.

Влияние атмосферы

Следует учитывать, что при прохождении солнечного излучения через атмосферу происходит изменение его интенсивности, вызванное влиянием присутствующих в атмосфере газов и аэрозолей.

В частности, водяные пары вызывают наиболее слабое поглощение на длинах волн 0,6 и 0,66 мкм, чуть сильнее – на 0,73, 0,82 и 0,91 мкм, наибольшее поглощение – на 0,94 и 1,14 мкм. Поглощение в окрестностях длин волн 1,375, 1,9 и 2,5 мкм практически не позволяет восстановить отражательные характеристики объектов.

Таким образом, гиперспектральные данные дистанционного зондирования содержат информацию не только о поверхности, но и о состоянии атмосферы.

Устранение этого искажающего фактора и перевод изображения из единиц спектральной яркости в единицы спектрального коэффициента отражения проводится с помощью процедуры атмосферной коррекции.

Существует два класса алгоритмов атмосферной коррекции: эмпирические и физические. Первый тип алгоритмов основан на использовании статистических характеристик изображения и осуществляет скорее калибровку, а не компенсацию. Восстановить истинные параметры атмосферы в момент съёмки можно только на основе физических моделей. В настоящее время в этом классе наиболее проработанными являются модули ATREM и FLAASH (США). Схема работы модулей представлена на рис. 1 и 2.

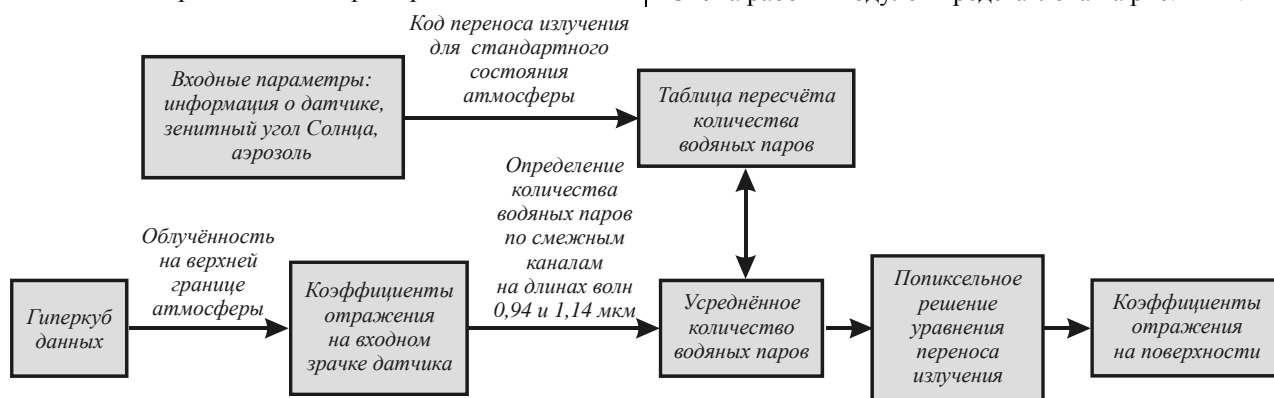


Рис. 1. Схема работы модуля ATREM

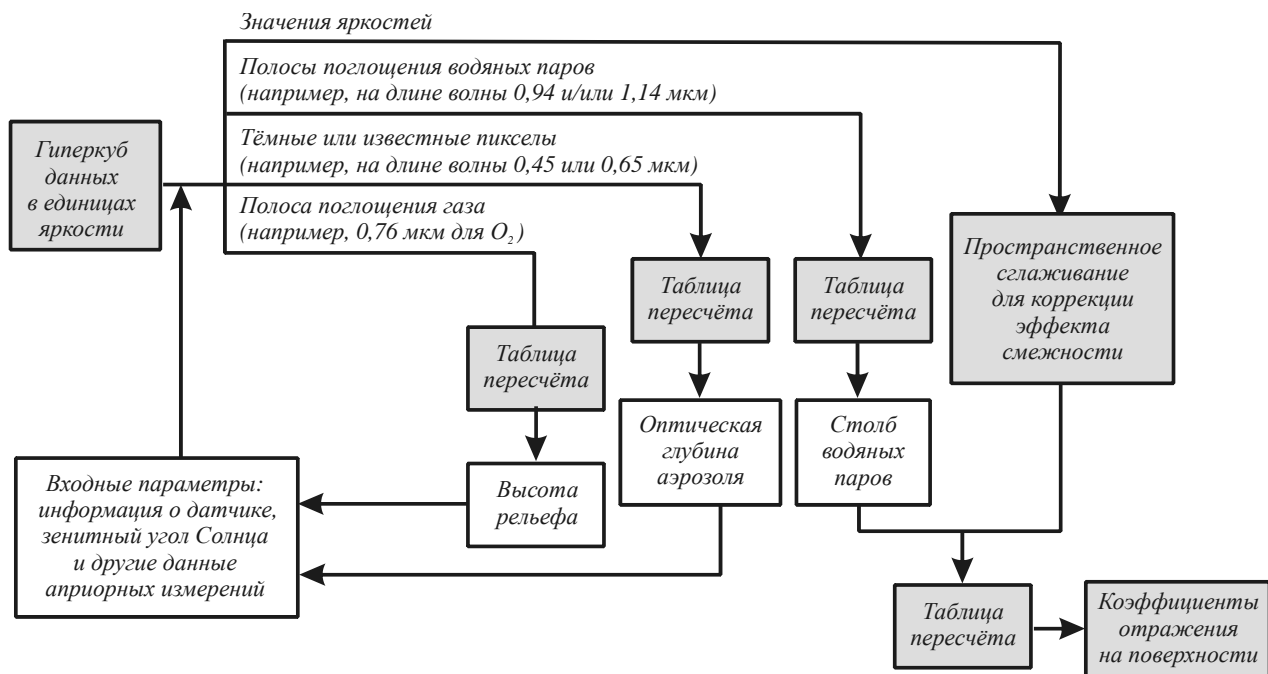


Рис. 2. Схема работы модуля FLAASH

Классическая атмосферная коррекция осуществляется в три этапа.

На первом восстанавливаются параметры атмосферы, главным образом, характеристики аэрозоля (дальность видимости и, по возможности, «тип» аэрозоля) и величина

на столба водяных паров. Так как существующие методы позволяют восстановить аэрозоли лишь по весьма ограниченному набору типов поверхностей (вода и очень тёмная почва), обычно рассчитывается только средняя дальность видимости по сцене. Спектральная сигнатура

водяных паров довольно специфична, что позволяет оценить их количество для каждого пиксела сцены.

Второй шаг – решение уравнения радиационного переноса для заданного типа аэрозоля и столба водяных паров с целью пересчёта зафиксированного датчиком излучения в коэффициенты отражения поверхности.

Заключительный этап – дополнительная обработка, так называемая «спектральная доводка», устраняющая оставшиеся артефакты.

При решении уравнения радиационного переноса предполагается, что датчик фиксирует излучение нескольких видов [2] (рис. 3):

– отражённое от Земли солнечное излучение, которое на всём своём пути распространяется без рассеяния ($L_{ПР}$);

– рассеянное излучение, которое распространяется вниз и отражается от проекции пиксела по земной поверхности ($L_{ДИФ}$) и от её окрестности ($L_{СМЕЖ}$);

– рассеянное излучение, которое распространяется к датчику, не достигнув земной поверхности (атмосферная дымка, $L_{Д}$).

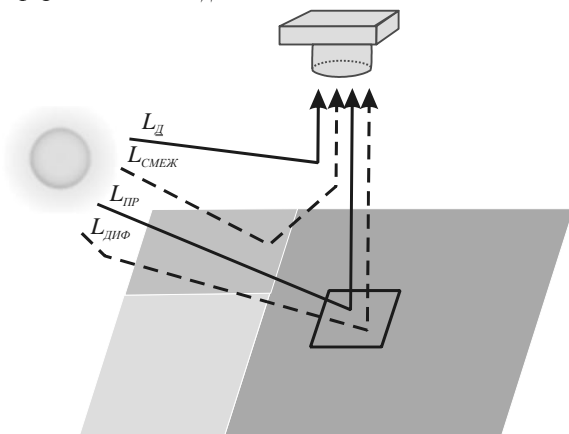


Рис. 3. Излучение, фиксируемое датчиком, и его прохождение через атмосферу

Следует обратить внимание, что процесс переотражения излучения приводит к увеличению пространственной корреляции между значениями соседних пикселей и к снижению контрастности границ (например, береговых линий). Многократные отражения и рассеяние обычно менее существенны, поскольку при каждом таком событии величина плотности потока излучения заметно снижается.

Рассматривая земную поверхность как однородную и приняв отражение ламбертовым, фиксируемое датчиком излучение можно описать следующим соотношением [3]:

$$L = G_t \frac{\rho}{1 - \rho_e S} + G_b \frac{\rho_e}{1 - \rho_e S} + L_0, \quad (1)$$

где ρ – отражательная способность поверхности в пределах проекции пиксела; ρ_e – отражательная способность поверхности, усреднённая по некоторой окрестности пиксела; S – сферическое альbedo атмосферы; L_0 – обратная засветка от верхней кромки атмосферы, G_b и G_t – коэффициенты, зависящие от параметров атмосферы и геометрических условий съёмки.

Модель атмосферы представляет собой набор симметричных сферических оболочек с границами на высотах $Z_j, j = 1, N$. Температура, давление и плотности абсорберов (газов и аэрозолей) имеют различные значения на границах слоёв. Предполагается, что между границами слоёв профиль температуры имеет линейную зависимость, а профили давления и плотности подчиняются экспоненциальному закону.

Основным выражением для луча, проходящего через атмосферу, является закон Снелла для сферически симметричной среды:

$$n(r)r \sin \theta = C, \quad (2)$$

где n – коэффициент преломления, r – расстояние до точки на линии распространения луча, θ – зенитный угол в заданной точке, C – константа [4].

В построении спектральной модели прохождения излучения через атмосферу необходимо адекватно учесть структуру и температуру окружающей среды для данной местности. В алгоритме FLAASH заложена база данных, построенная на основании реальных вертикальных профилей для различных температур и соотношений газов. Температурные условия учтены для тропиков (15° с.ш.), лета и зимы в средних широтах (июль и январь на 45° с.ш.), субарктического лета и зимы (июль и январь на 60° с.ш.), а также для стандартных условий США. В модели атмосферы заложены различные соотношения H_2O , O_3 , N_2O , CO и CH_4 , которые, наряду с CO_2 , являются наиболее значимыми компонентами атмосферы.

Моделирование изменения оптических свойств аэрозоля в зависимости от высоты основано на разделении атмосферы на четыре области, представленные следующими слоями:

- 1) приземный слой (от 0 до 2 км);
- 2) верхний слой тропосферы (от 2 до 10 км);
- 3) нижний слой стратосферы (от 10 до 30 км);
- 4) верхний слой атмосферы (от 30 до 100 км).

Возможные состояния приземного слоя (до 2 км) представлены различными моделями (сельская местность, городская местность, прибрежная территория) для каждого из нескольких диапазонов метеорологической дальности от 2 и 50 км, а также в зависимости от влажности. Предполагается, что в приземном слое распределение аэрозольных частиц по размеру не зависит от высоты, изменяется только количество частиц. Несмотря на то, что с увеличением высоты уменьшение плотности воздуха носит почти экспоненциальный характер, концентрация аэрозоля на разных высотах имеет различные значения. При средней и низкой видимости аэрозоли сконцентрированы в равномерно смешанном слое на высоте от 1 до 2 км относительно поверхности. При прозрачной и очень прозрачной атмосфере, т.е. при дальности видимости от 23 до 50 км, вертикальное распределение аэрозолей имеет экспоненциальный характер. При плохой видимости (дальность видимости 10, 5 и 2 км) аэрозольное ослабление не зависит от высоты, если она не превышает 1 км, а затем существенно уменьшается.

Выше приземного слоя в тропосфере распределение и природа атмосферных аэрозолей становится менее чувствительной к изменениям географических координат и погодных условий. Основным фактором, оказывающим влияние на распределение аэрозоля, являются сезонные колебания. Измерения концентрации аэрозолей, проведённые Блиффордом и Рингером, а также Хоффманом и др., указывают на увеличение концентрации частиц в верхнем слое тропосферы в весеннее и летнее время.

Предполагается, что аэрозоль в каждой модели представляет собой смесь четырёх основных видов частиц: пыль, океанические, водорастворимые и копоть. Например, в городском аэрозоле больше копоти и водорастворимых частиц, чем в морском, в котором преобладают океанические частицы (соль и испарения морской пены). В сельской (или континентальной) модели большой процент пыли. При таком различии в рассеивателях выбор модели имеет существенное влияние на передачу излучения в нижних слоях атмосферы и на восстановление отражения.

На рис. 4 представлены спектральные сигнатуры нескольких природных образований до и после атмосферной коррекции. Исходные спектры имеют схожие особенности: завышенное отражение в синей области спектра, вызванное большим рассеянием излучения с малой длиной волны, и явные провалы на длине волны 940 нм, вызванные поглощением водяных паров. Очевидно, что истинные отражательные характеристики поверхностей искажены. После атмосферной коррекции эти искажения практически полностью устранены.

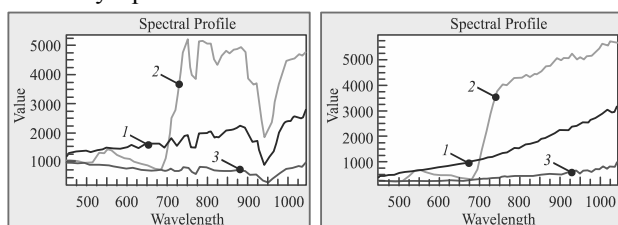


Рис. 4. Спектральные характеристики до и после атмосферной коррекции: 1 – почва первого типа; 2 – растительность; 3 – почва второго типа

При работе с восстановленными спектральными сигнатурами нельзя забывать о том, что и FLAASH, и ATREM могут давать ошибочные результаты при восстановлении водяных паров в следующих ситуациях:

- во-первых, над водными поверхностями – из-за очень низкого уровня сигнала;

- во-вторых, если высоты местности над уровнем моря в пределах сцены различны, т.к. в модели используется предположение, что на изображении они одинаковы (на изображении водяных паров будут проявляться контуры рельефа).

Кроме того, сигнатуры могут иметь артефакты на границах полос поглощения в виде ложных пиков, которые возникают при сбивой настройке длин волн аппаратуры или повышенной влажности атмосферы.

Во многих моделях атмосферной коррекции (во FLAASH учёт эффекта смежности осуществляется по

выбору пользователя) ρ и ρ_e заменяются одной величиной. Это приводит к удовлетворительным результатам для однородных поверхностей и при очень хорошей видимости (прозрачной атмосфере), но в условиях дымки и тумана вызывает погрешности.

Неполные или неточные входные параметры приводят к дополнительным погрешностям, не допустимым для большинства задач ДЗЗ.

В частности, дальность видимости – это индикатор ослабления излучения в нижних слоях атмосферы. Поэтому заниженное значение этого входного параметра соответствует более высокой концентрации аэрозолей и, следовательно, изменяет соотношение между рассеянной и отражённой компонентами излучения при решении уравнения радиационного переноса [5].

Методы обработки

Хорошо отработанной технологией является обнаружение присутствия в сцене объектов с заданными спектральными сигнатурами путём проведения согласованной фильтрации. Согласованные фильтры повышают контраст цели относительно фона, который может быть представлен в виде структурированной или стохастической модели [6]. На выходе формируется изображение, в котором значения пикселей соответствуют процентному содержанию искомого эталона в элементах сцены (в интервале от 0,0 до 1,0).

Другой путь преобразования данных с целью увеличения различий между фоном и объектами интереса – декорреляция изображений, полученных в различных спектральных каналах, с использованием метода главных компонент (РСА). Однако малые объекты интереса не вносят существенного вклада в статистику и могут не проявиться в новых компонентах. Для решения этой проблемы используется метод независимых компонент (ICA), позволяющий с большей вероятностью обнаружить редкие объекты. Он удобен тем, что не требует знания исходных источников и основан на предположении, что среди компонентов смеси не более чем один имеет гауссовское распределение, а также что они статистически независимы, т.е. ни один из них не передаёт никакой информации другим компонентам. Помимо независимости, для того чтобы гарантировать единственное решение, необходимо, чтобы количество наблюдаемых компонент было не меньше, чем число исходных сигналов [7].

Экспериментальные исследования

В статье представлены результаты обработки имеющегося в свободном доступе на сайте Геологической службы США снимка территории Самарской области в формате GeoTIFF, полученного КА EO-1 (аппаратура Hyperion) в июле 2010 года (рис. 5). Исследования проводились с использованием программного пакета ENVI 5.0.

Аппаратура Hyperion производит съёмку в 242 каналах в диапазоне от 420 до 2400 нм с пространственным разрешением 30 м. Следует отметить, что гиперспектрометры КА EO-1 и «Ресурс-П» имеют одинаковый размер проекции пиксела.



Рис. 5. Снимок с КА EO-1 с тестовыми участками

Помимо стандартной процедуры пересчёта данных уровня L1 в единицы яркости, для гиперкуба проводилась дополнительная предварительная обработка с целью отбора откалиброванных каналов, а также устранения одиночных или повторяющихся тёмных вертикальных полос на изображениях [8, 9].

Процедура атмосферной коррекции проводилась с помощью модуля FLAASH.

Метод согласованной фильтрации для обнаружения объектов интереса применялся в двух вариантах:

- в качестве эталона использовался фрагмент самого снимка;
- эталон выбирался из спектральной библиотеки.

На рис. 6 представлен пример обнаружения мало-размерных водоёмов, визуально практически не отличимых на снимке от растительности. В качестве эталона задавался участок озера, указанный в верхней части рисунка. Пиксели с низким значением согласования исключались из итогового результата путём проведения пороговой обработки.

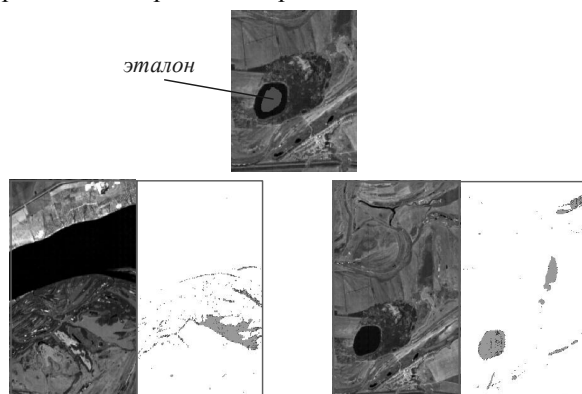


Рис. 6. Обнаружение водоёмов методом согласованной фильтрации

На рис. 7 показан пример обнаружения дорожного покрытия по эталону, взятому из спектральной библиотеки Геологической службы США (USGS). Поскольку проекция пиксела Nuregion составляет 30 м, заведомо понятно, что все дороги представляют собой субпиксельные объекты, чаще всего смешанные с растительностью или грунтом. Согласованная фильтрация позволяет найти их на изображении.

Метод независимых компонент с помощью двумерных диаграмм рассеяния позволил выделить на

гиперспектральном снимке по тестовому участку «Новонаталино» эталоны четырёх объектов интереса (рис. 8). По этим спектральным эталонам с помощью метода согласованной фильтрации были выявлены сами объекты (рис. 9).

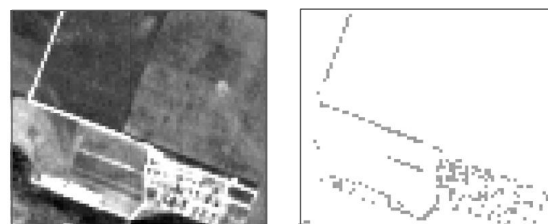


Рис. 7. Обнаружение дорожного покрытия методом согласованной фильтрации

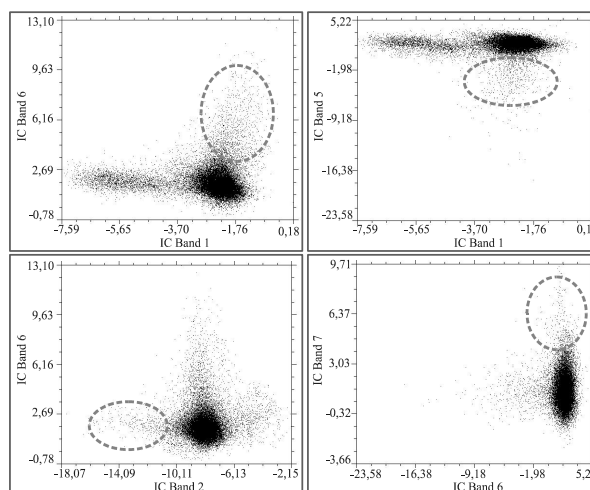


Рис. 8. Выделение эталонов объектов интереса

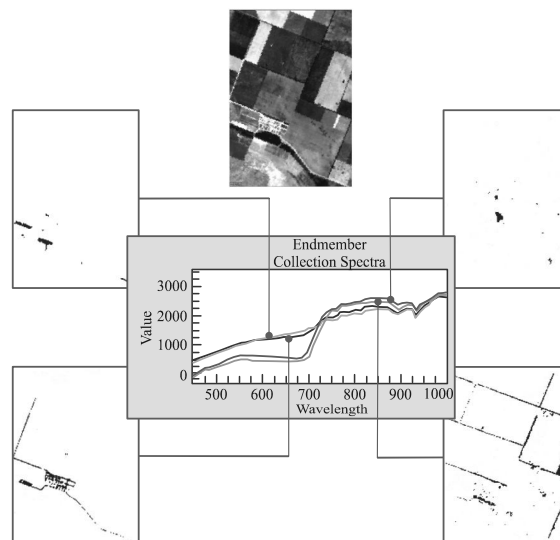


Рис. 9. Обнаружение объектов интереса по спектральным характеристикам

Проведённые исследования показывают возможности обнаружения объектов растительного и антропогенного происхождения по космическим гиперспектральным снимкам среднего пространственного разрешения при решении задач мониторинга окружающей среды. Рассмотренные технологии обработки изображений могут быть применены к информации, получаемой КА «Ресурс-П».

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ «ОФИ_М» № 13-01-12014.

Литература (References)

1. **Keshava, N.** Survey of Spectral Unmixing Algorithms // Lincoln Laboratory Journal. – 2003. – V. 14, N 1 – P. 55-78.
2. **Kerekes, J.P.** Hyperspectral Imaging System Modeling / J.P. Kerekes, J.E. Baum // Lincoln Laboratory Journal. – 2003. – V. 14, N 1 – P. 117-130.
3. **Yuanliu, X.** Atmospheric correction of hyperspectral data using MODTRAN model / X. Yuanliu, W. Runsheng, L. Shengwen [et al.] // Proceedings of 16th National Symposium on Remote Sensing of China, 7-10 September 2007, Beijing, China.
4. **Kneizys, F.X.** The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 MODEL / F.X. Kneizys, L.W. Abreu [et al.] // MODTRAN Report. – 1996. – P. 6-43.
5. **Griffin, M.K.** Compensation of Hyperspectral Data for Atmospheric Effects / M. K. Griffin, H.K. Burke // Lincoln Laboratory Journal. – 2003. – V. 14, N 1 – P. 29-54.
6. **West, J.E.** Matched Filter Stochastic Background Characterization for Hyperspectral Target Detection / College of Science, Rochester Institute of Technology. – 2005. – 192 p.
7. **Robila, S.A** Investigation of Spectral Screening Techniques for Independent Component Analysis Based Hyperspectral Image Processing [Электронный ресурс] / URL: <http://www.cs.uno.edu/~stefan/>
8. EO-1 User Guide Version 2.3 / Compiled by Dr. Richard Beck for the Satellite Systems Branch USGS Earth Resources Observation Systems Data Center (EDC)/ – July 15, 2003. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.eo1.usgs.gov>, <http://www/eo1.gsfc.nasa.gov>.
9. **Jupp, D.L.B.** Datt, B., Lovell, J., Campbell, S., King, E. and others, Science Validation Team and others, 2002. Discussions around Hyperion Data: Background Notes for the Hyperion Data Users Workshop, CSIRO, Canberra, Australia.

THE FEATURES OF HYPERSPECTRAL REMOTE SENSING DATA PROCESSING UNDER ENVIRONMENT MONITORING TASKS SOLUTION

Y.N. Zhuravel, A.A. Fedoseev

State Research and Production Space Centre «TsSKB-Progress», Samara,
Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

Abstract

The aspects of remote sensing data processing for natural and anthropogenic objects detection and identification are examined. The research results made by hyperspectral image of Samara region are given.

Key words: remote sensing, spectral signature, mixed pixel, atmospheric correction, independent component analysis, matched filtering.

Сведения об авторах

Журавель Юлия Николаевна, в 1990 году окончила Куйбышевский авиационный институт (ныне – Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ) по специальности «Прикладная математика», работает начальником сектора в научно-производственном отделе тематической обработки и распространения информации ДЗЗ. С 2013 года обучается в аспирантуре СГАУ. Область научных интересов: дистанционное зондирование Земли, методы обработки изображений.

E-mail: csdb@samspace.ru.

Yuliya Nikolaevna Zhuravel graduated from Kuibyshev Aviation Institute (presently, S. P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University) (SSAU)) in 1990, majoring in Applied mathematics. Currently works as the head of sector in Scientific production department of remote sensing data thematic processing and distribution. Since 2013 she is a postgraduate student of SSAU. Sphere of scientific interests: remote sensing, digital image processing.



Федосеев Александр Андреевич, 1988 года рождения, в 2011 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ. В настоящее время работает инженером-конструктором в научно-производственном отделе тематической обработки и распространения информации ДЗЗ, является аспирантом СГАУ. Область научных интересов: дистанционное зондирование Земли, методы обработки изображений, интеллектуальные транспортные системы. Является автором 18 научных публикаций.

E-mail: csdb@samspace.ru.

Alexandr Andreevich Fedoseev (b. 1988) graduated (2011) from S. P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU). Currently works as the design engineer in Scientific production department of remote sensing data thematic processing and distribution. He is a postgraduate student of SSAU. Sphere of scientific interests: remote sensing, digital image processing, intellectual transport systems. He is the author of 18 scientific publications.

Поступила в редакцию 18 сентября 2013 г.