

УДК 528.7+629.78

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ И ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

© 2013 Г. П. Аншаков, Ю. Н. Журавель, А. А. Федосеев

ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Рассматриваются вопросы обработки данных дистанционного зондирования Земли с целью обнаружения и идентификации объектов природного и антропогенного происхождения. Приводятся результаты исследований, проведённых по мульти- и гиперспектральным снимкам территории Самарской области, полученным с КА EO-1 и Landsat-8.

*Дистанционное зондирование, спектральная сигнатура, анализ изображений, вегетационный индекс, спектральный угол, согласованная фильтрация.*

Данные дистанционного зондирования Земли находят всё более широкое применение в различных отраслях экономики благодаря развитию методов обработки информации и появлению оптико-электронной аппаратуры нового поколения.

Идентификация элементов сцены по данным панхроматической съёмки, даже при достаточно высоком пространственном разрешении, может вызывать затруднения, так как проводится в основном по форме объекта и его тени. Повысить эффективность обнаружения и распознавания позволяет применение данных спектральной съёмки, которые могут использоваться как совместно с данными о топологии наблюдаемых объектов, так и самостоятельно.

Мультиспектральные изображения начали использовать в качестве исходных данных для авиационного и космического мониторинга суши и водной поверхности более 50 лет назад. Изначально спектральная съёмка была ориентирована на решение задач сельского хозяйства и геологии, поэтому использовалось несколько тщательно выбранных спектральных каналов в видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра. Усовершенствованные версии такой мультиспектральной аппаратуры используются и сегодня. Так, 11 февраля 2013 года в США осуществлён запуск КА Landsat-8. Как и

предыдущие КА этой серии, он предназначен для мониторинга окружающей среды, в частности, контроля состояния водных и сельскохозяйственных ресурсов, и будет эксплуатироваться совместно NASA и Геологической службой США (USGS) [1]. В состав установленной на Landsat-8 целевой аппаратуры входят сканирующие радиометры OLI (Operational Land Imager) и TIRS (Thermal Infrared Sensor).

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), HypSIRI (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 высокодетального, 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.

Основопологающим понятием при обработке спектральной информации является сигнатура, т.е. зависимость отражательной способности материалов от длины волны электромагнитного излучения.

В процессе спектральной съёмки формируется многомерное изображение, так называемый куб данных, в котором два измерения фиксируют пространственное положение объектов местности на плоскости, а третье – их сигнатуру. Вследствие этого каждый пиксел изображения характеризуется своим собственным спектром. Гиперспектральная аппаратура, в отличие от мультиспектральной, работает в смежных узких спектральных каналах в пределах окон прозрачности атмосферы, что позволяет строить практически непрерывную кривую спектрального отражения для всех элементов сцены.

Материалы могут иметь схожие характеристики отражения и поглощения в большом интервале длин волн и различаться лишь в определённых узких диапазонах, поэтому мультиспектральные системы не позволяют проводить идентификацию с высокой точностью из-за малой спектральной размерности куба данных. Кроме того, аппаратура может просто не иметь нужного спектрального канала, особенно если некий материал не относится к категории широко распространённых.

Мультиспектральные данные позволяют осуществлять разделение скальных пород и почв, чистой и замутнённой воды, различных типов растительности, а также некоторых материалов искусственного происхождения. Гиперспектральные данные позволяют производить углублённый анализ свойств поверхностей, например, оценивать влажность и солёность почвы, биохимический состав растительности.

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

Информацию, полученную мульти- и гиперспектральными средствами наблюдения, можно использовать в следующих основных направлениях:

1) для решения задач ресурсно-сырьевого картографирования;

2) для выделения объектов, в том числе искусственного происхождения, из множества подобных или обнаружения объектов, размер которых меньше номинального размера пиксела (обнаружение аномалий и целей).

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 автоматизированной обработки, которая может быть произведена с помощью следующих методов:

– построение индексных изображений;

– классификация с обучением;

– преобразования уменьшения спектральной размерности;

– субпиксельное разделение смесей.

Наиболее простым методом обработки является построение индексных изображений на основе разностей или отношений значений яркости в определённых информативных каналах. Значение полученного индекса позволяет выделить исследуемый объект или оценить его состояние.

Классификация представляет собой процесс назначения типа материала (или

класса) каждому пикселу сцены. Обнаружение аномалий предполагает определение местоположения пикселей сцены, отличающихся от всех остальных. Алгоритмы обнаружения целей предназначены для выделения пикселей, в которых присутствуют материалы с заданными спектральными свойствами. Технология обнаружения целей широко применяется в изучении окружающей среды.

Ключевым моментом при решении задач классификации и обнаружения является выбор эталонного спектра. Источниками спектральных эталонов могут служить спектральные библиотеки либо само изображение. Идеального фиксированного спектра для любого заданного материала не существует. Спектры, наблюдаемые от образцов одного и того же материала, никогда не бывают идентичны даже в лабораторных испытаниях из-за вариаций в структуре поверхности. Количественно изменчивость спектра ещё более глубоко выражена в данных ДЗЗ из-за вариаций в шуме датчика, состоянии материалов, их местоположении, окружающих фонах и т.п. (например, какие-то объекты могут оказаться целиком или полностью в тени других объектов). В результате измеренные спектры, соответствующие пикселям с тем же самым типом поверхности, всегда имеют некоторые расхождения, что затрудняет обнаружение материалов (веществ) по уникальным спектральным сигнатурам.

Другая проблема является результатом того, что суммарное излучение от всех объектов в пределах элемента пространственного разрешения фиксируется аппаратурой как одиночный пиксел изображения. Поэтому в зависимости от пространственного разрешения датчика и распределения элементов сцены куб данных содержит как чистые, так и смешанные пиксели.

Изменчивость спектра и смешанные пиксели – главные препятствия, которые должны быть учтены при решении задачи тематической обработки спектральной информации.

У каждого из указанных выше методов обработки есть свои достоинства и недостатки. В частности, после проведения классификации каждый пиксел изображения можно отнести только к одному конкретному классу материалов. При низком пространственном разрешении это не соответствует действительности. С другой стороны, высокая точность субпиксельного разделения смесей возможна только при наличии правильно заданных исходных спектральных составляющих.

Выбор наиболее подходящего метода зависит от свойств наблюдаемой сцены, цели исследований, а также пространственного и спектрального разрешения имеющихся в наличии данных ДЗЗ.

В данной статье представлены результаты исследований эффективности применения мульти- и гиперспектральных материалов дистанционного зондирования, проведённых на базе классификатора тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды [2], разработанного ООО «Байкальский центр» совместно с ООО Инженерно-технологический центр «СканЭкс» в 2008 году (редакция 7). Для анализа использовались имеющиеся в свободном доступе на сайте Геологической службы США снимки территории Самарской области в формате GeoTIFF, полученные КА EO-1 (аппаратура Hyperion и ALI) в июле 2010 года и КА Landsat-8 (аппаратура OLI) в апреле и июле 2013 года (рис. 1, 2). Основные технические характеристики аппаратуры представлены в табл. 1. Следует отметить, что гиперспектрометры КА EO-1 и «Ресурс-П» имеют одинаковый размер проекции пиксела. Помимо стандартной процедуры пересчёта данных уровня L1 в единицы яркости, для гиперспектральных изображений проводилась дополнительная предварительная обработка с целью отбора откалиброванных каналов, а также устранения одиночных или повторяющихся тёмных вертикальных полос на изображениях [3, 4].

Таблица 1. Характеристики аппаратуры наблюдения

КА EO – 1						КА Landsat – 8		
ALI			Hyperion			OLI		
Канал	Длина волны, нм	Разрешение, м	Канал	Длина волны, нм	Разрешение, м	Канал	Длина волны, нм	Разрешение, м
PAN	480 – 690	10	8 – 57	420 – 930	30	PAN	500 – 680	15
MS-1	433 – 453	30				MS-1	433 – 453	30
MS-2	450 – 515	30				MS-2	450 – 515	30
MS-3	525 – 605	30				MS-3	525 – 600	30
MS-4	630 – 690	30				MS-4	630 – 680	30
MS-5	775 – 805	30						
MS-6	845 – 890	30	79 – 224	930 – 2400	30	MS-5	845 – 885	30
MS-7	1200 – 1300	30				MS-6	1360 – 1390	30
MS-8	1550 – 1750	30				MS-7	1560 – 1660	30
MS-9	2080 – 2350	30				MS-8	2100 – 2300	30



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



Рис. 2. Снимки с КА Landsat-8

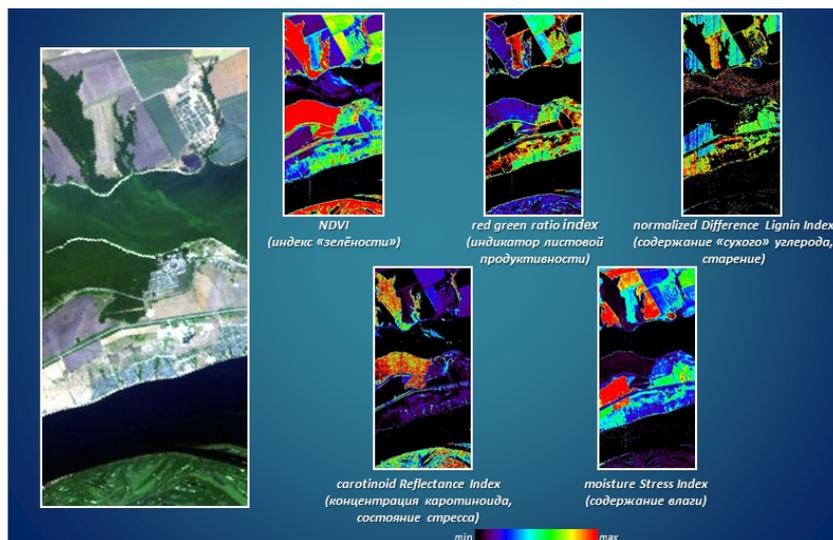


Рис. 3. Вычисление вегетационных индексов по данным Hyperion

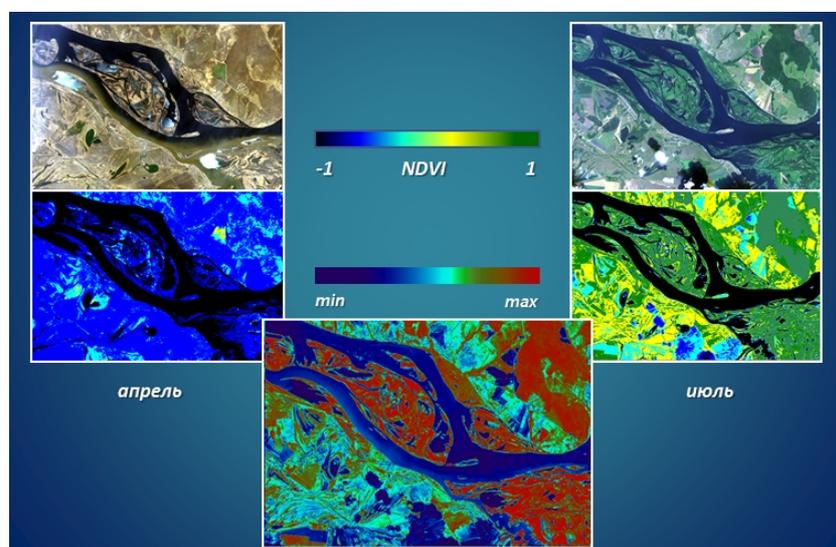


Рис. 4. Динамика изменения индекса NDVI по данным OLI

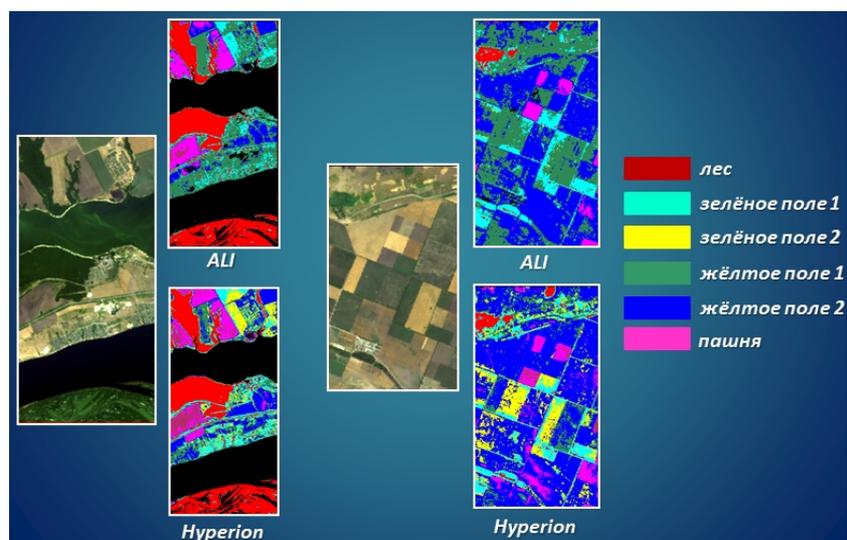


Рис. 5. Классификация природных ландшафтов

Задача определения структуры ландшафтов и оценки их динамики может решаться путём вычисления вегетационных индексов (рис. 3, 4), методами классификации с обучением (рис. 5), а также с применением согласованной фильтрации.

Гиперспектральные снимки в отличие от мультиспектральных позволяют получать не только широкополосные, но и узкополосные индексы, построенные по значениям коэффициентов отражения в точно заданных спектральных каналах.

Одним из наиболее известных и точных методов классификация с обучением является метод SAM (Spectral Angle Mapper), который позволяет оценивать спектральную схожесть тестового пиксела и эталона по косинусу угла между их векторами в многомерном пространстве [5].

Основные преимущества алгоритма SAM – простота и высокая скорость обработки. Кроме того, он подавляет влияние эффектов затенения поверхностей и нечувствителен к уровню солнечной освещённости.

На рис. 5 представлены результаты построения карт классификации по фраг-

ментам снимков Hyperion и ALI. В качестве эталонов выбирались образцы ландшафтов на гиперспектральном снимке. На мультиспектральных снимках наблюдается слияние некоторых классов в один класс.

Обнаружение присутствия в сцене объектов с заданными спектральными сигнатурами путём проведения согласованной фильтрации является хорошо проработанной технологией. Согласованные фильтры повышают контраст цели относительно фона, который может быть представлен в виде структурированной или стохастической модели [5]. На выходе формируется изображение, в котором значения пикселов соответствуют процентному содержанию искомого эталона в элементах сцены (в интервале от 0 до 1).

На рис. 6 представлен пример обнаружения малоразмерных водоёмов, практически не отличимых на снимке от растительности, по данным Hyperion. В качестве эталона задавался участок озера, обозначенный красным цветом.

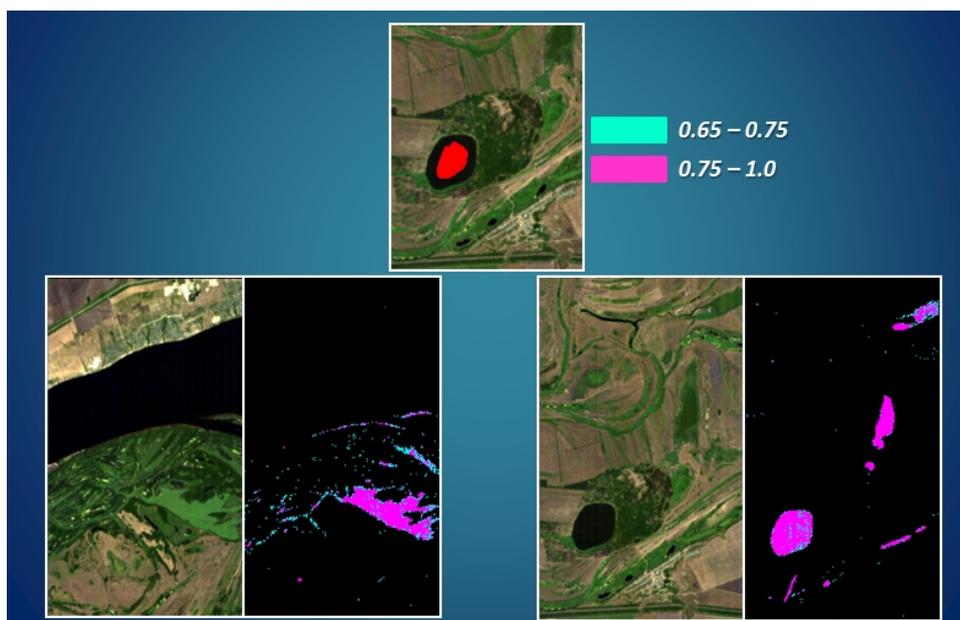


Рис. 6. Обнаружение водоёмов методом согласованной фильтрации

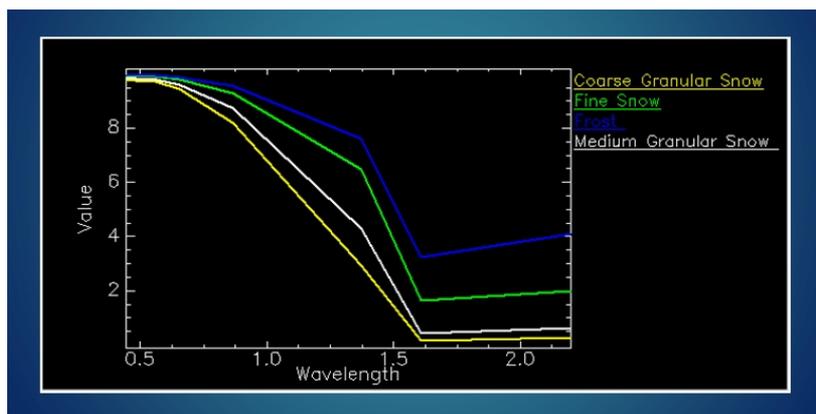


Рис. 7. Отражательные характеристики снега

Мульти- и гиперспектральные данные ДЗЗ позволяют определять границы схода снежного и ледового покрова, а также его мощность и влажность. С точки зрения модели переноса излучения снежные гранулы можно считать независимыми рассеивателями, так как их размер и расстояние между центрами намного больше длины волны света. Из-за много-

кратного рассеяния при попадании излучения в снежную массу глубина его проникновения составляет не более 0,5 м для синих волн и всего лишь несколько миллиметров в ближнем ИК-диапазоне [6].

На рис. 8 представлены результаты классификации ледового покрова по эталонным отражательным характеристикам для гранул различного размера (рис. 7).

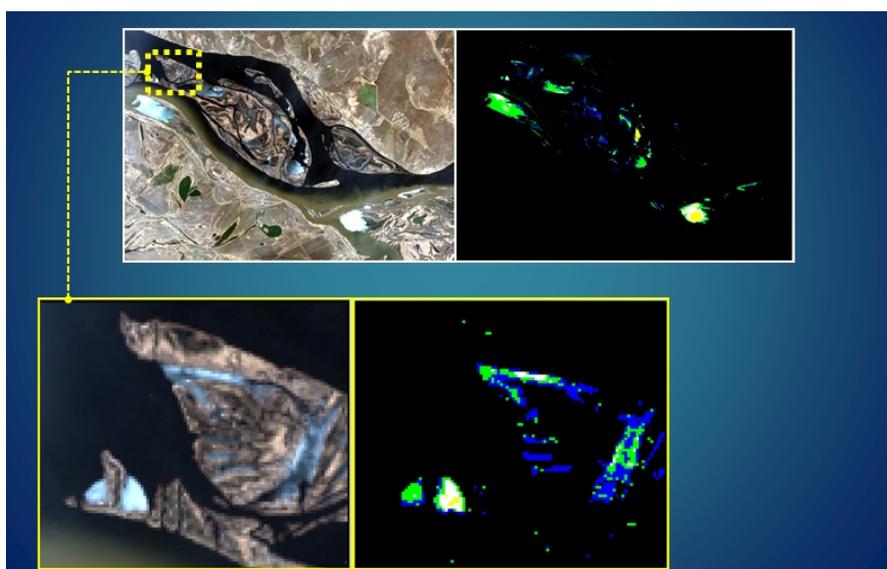


Рис. 8. Классификация ледового покрова

Задача оценки антропогенного воздействия на поверхностные воды становится весьма актуальной для Самарской области в связи с наблюдающимся аномальным повышением температуры воздуха в весенне-летний период. Водоёмы, в которых скорость протока вод незначительна, подвержены так называемому «цветению», вызванному попаданием в них стоков с высоким содержанием пита-

тельных веществ как органического (стоки сельскохозяйственных предприятий, хозяйственно-бытовые стоки), так и минерального происхождения (смыв удобрений с полей). Цветение оказывает негативное влияние на качество воды с точки зрения экологии и возможности её использования. Массовое размножение цианобактерий в верхнем биогоризонте пресноводных экосистем уменьшает прозрач-

ность воды и создаёт существенные помехи в водоснабжении. Из-за дефицита растворённого в воде кислорода возможна массовая гибель рыб, из-за недостатка освещённости вследствие создания цианобактериями пленки на поверхности воды гибнут водоросли – основная пища многих водных организмов. В основном цветение воды вызывают представители следующих родов цианобактерий – *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Microcystis*, *Oscillatoria*, *Gomphosphaeria*, *Scenedesmus* [7, 8].

Для мониторинга популяций цианобактерий можно использовать методы спектрального анализа данных ДЗЗ, основываясь на том факте, что пигмент цианобактерий влияет на цвет воды. Он поглощает и отражает электромагнитное излучение на определённых длинах волн. Однако существуют и другие оптически активные компоненты, такие как растворённые органические вещества и неорганические взвеси, которые тоже взаимодействуют с падающим излучением и могут уменьшать точность обнаружения пигмента водорослей. По этой причине использование мультиспектральных данных для экологического мониторинга внутренних и прибрежных вод нецелесообразно.

Графики отражательных характеристик воды с различной концентрацией

цианобактерий (рис. 9) позволяют выделить следующие характерные длины волн:

680 нм – полоса поглощения  $\alpha$ -хлорофилла,

620 нм – полоса поглощения фикоцианина,

650 нм – полоса свечения фикоцианина,

550 и 700 нм – полосы отражения в зелёном и крайнем красном диапазонах.

Потенциальные области цветения определяются путём проведения пороговой обработки индексных изображений, построенных по гиперспектральным данным в указанных каналах. На рис. 9 приведён пример обнаружения зоны распространения цианобактерий в районе Междуреченска по снимку с датчика Hyperion. На цветовом композите, представленном в правой части рисунка, имеются фрагменты двух водохранилищ, причём одно из них (верхнее) визуально практически не отличается по цвету от расположенного рядом лесного массива, что свидетельствует о его значительном загрязнении. Маска, построенная по одному из каналов ближнего ИК диапазона, в которых наблюдается максимальный контраст между отражением воды и других поверхностей, позволяет исключить ошибки классификации и определить зоны распространения цианобактерий.

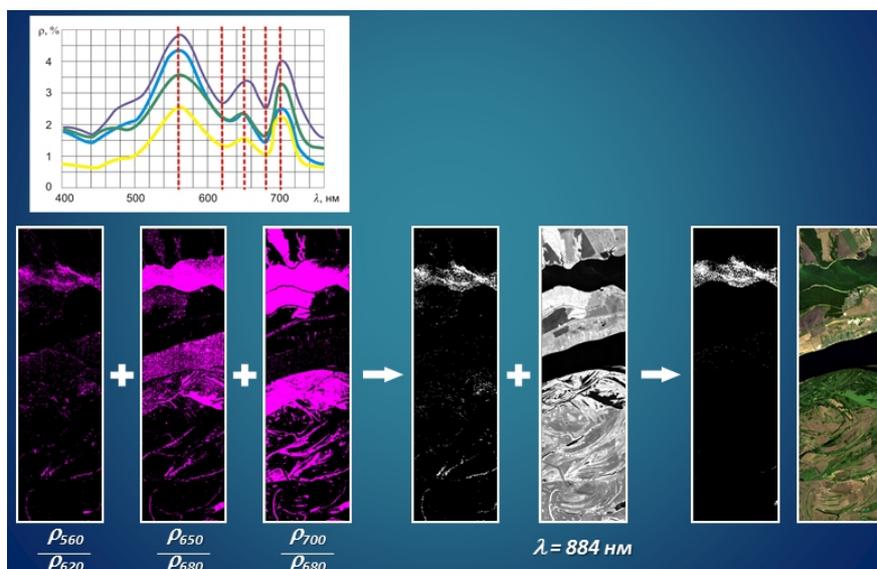


Рис. 9. Контроль цветения водохранилища

Данная технология применима к снимкам, полученным гиперспектральной аппаратурой КА «Ресурс-П».

На примере обработки данных аппаратуры OLI КА Landsat-8 следует отметить расширение возможностей использования данных ДЗЗ при наличии каналов в коротковолновом ИК-диапазоне.

Облака и их тени накладываются на изображение подстилающей поверхности и снижают точность обработки. Полосы поглощения молекулами воды и углекислого газа на длинах волн 1,4 и 1,9 мкм полностью блокируют излучение, и поэтому эти диапазоны не используются для получения изображений земной поверхности [9]. Но наличие канала 1360 – 1390 нм позволяет обнаруживать тонкие перистые облака верхнего яруса атмосферы, которые практически незаметны на космических снимках в видимом диапазоне, и повышать точность проведения атмосферной коррекции. Аналогичный канал имеется и в аппаратуре MODIS КА Terra и Aqua (США).

В присутствии плотных облаков наблюдение в видимом диапазоне не даёт никакой информации о том, что происходит под этими облаками. Используя каналы в коротковолновом ИК-диапазоне, можно производить оценку процентного содержания влаги в растительности и почве за счёт того, что солнечное излучение способно проникать сквозь слои облачности в этом диапазоне длин волн [10, 11].

На рис. 10 представлен фрагмент снимка с КА Landsat-8, на котором часть сцены закрыта облачностью. Пропускание атмосферы уменьшается по направлению к синему региону спектра, поэтому информативность снимка более всего снижена в канале 450 – 515 нм. При увеличении длины волны влияние облачности уменьшается и практически пропадает в канале 1560 – 1660 нм, что позволяет строить цветовые композиты в псевдоцветах.

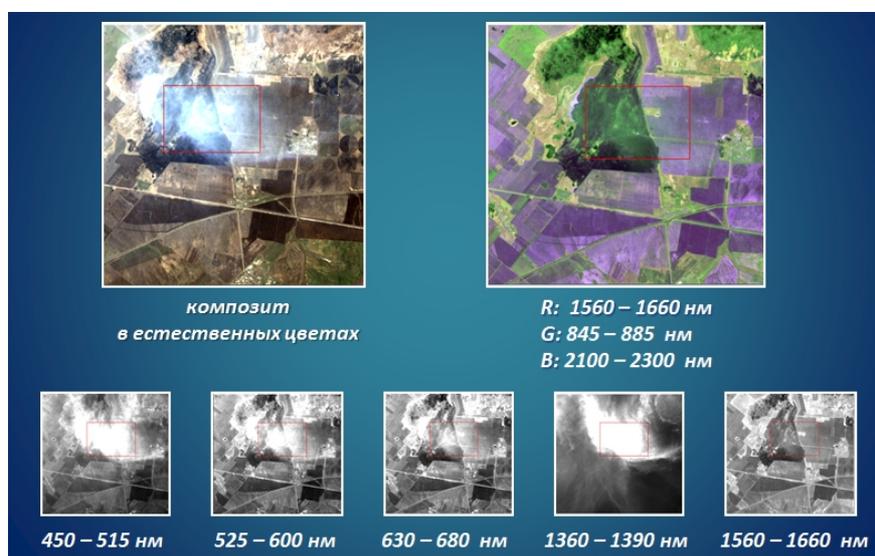


Рис. 10. Влияние облачности в различных каналах

Проведённые исследования показывают преимущества использования гиперспектральных данных в решении задач мониторинга окружающей среды. Рассмотренные технологии обработки изображений могут быть применены к информации, получаемой КА «Ресурс-П».

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ «ОФИ\_М» №13-01-12014.

**Библиографический список**

1. Сайт Национального агентства по авионавигации и исследованию космического пространства США, 2013 [Электронный ресурс].  
– URL: <http://www.ldcm.gsfc.nasa.gov>.
2. Сайт ООО Инженерно-технологический Центр «СканЭкс», 2013 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.scanex.ru/ru/classificator>.
3. EO-1 User Guide Version 2.3. July 15, 2003. Compiled by Dr. Richard Beck for the Satellite Systems Branch USGS Earth Resources Observation Systems Data Center (EDC) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.eo1.usgs.gov>, <http://www/eo1.gsfc.nasa.gov>.
4. Discussions around Hyperion Data: Background Notes for the Hyperion Data Users Workshop. With contributions from D.L.B. Jupp, Bisun Datt, Jenny Lovell, Susan Campbell & Edward King and others...© 2002-2004 CSIRO Office of Space Science & Applications Earth Observation Centre.
5. West, Jason E. Matched Filter Stochastic Background Characterization for Hyperspectral Target Detection / Jason E. West // College of Science. Rochester Institute of Technology. 2005.
6. Thomas, H. Retrieval of subpixel snow-covered area and grain size from imaging spectrometer data / Thomas H. Painter<sup>a</sup>, Jeff Dozier<sup>b</sup>, Dar A. Roberts<sup>c</sup>, Robert E. Davis<sup>d</sup>, Robert O. Greene. // Remote Sensing of Environment, 2003. – № 85. – P. 64–77.
7. Ильинская, О.Н. Проблема цветения воды. Сайт академии наук республики Татарстан. 2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.antat.ru/index.shtml?1743>.
8. Шовенгердт, Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений [Текст] / Р.А. Шовенгердт; пер. с англ. А.В. Кирюшина, А.И. Демьяникова. – М.: Техносфера, 2010.
9. Lobo, F.L., Novo, E.M., Barbosa, C.M. Mapping potential cyanobacterial bloom using Hyperion/EO-1 data in Patos Lagoon estuary // Acta Limnol. Bras., 2009, vol. 21, no. 3. – 299-308 pp.
10. Hyperspectral atmospheric compensation through clouds and aerosols with physics-based radiative transfer algorithms / Thomas R. Caudill, Gail P. Anderson, Laila S. Jeong // Air Force Research Laboratory. – 1998.
11. Сайт Геологической службы США. 2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.landsat.usgs.gov>.

**THE EFFECTIVENESS OF USING MULTISPECTRAL AND HYPERSPECTRAL REMOTE SENSING DATA FOR ENVIRONMENTAL MONITORING**

© 2013 G. P. Anshakov, Y. N. Zhuravel, A. A. Fedoseev

State Research and Production Space Center “TsSKB-Progress”, Samara

Aspects of Earth remote sensing data processing for the detection and identification of natural and anthropogenic objects are examined in the paper. The results of research carried out on multi- and hyperspectral images of Samara region obtained from EO-1 and Landsat-8 spacecraft are presented.

*Remote sensing, spectral signal, image analysis, vegetation index, spectral angle, matched filtering.*

### Информация об авторах

**Аншаков Геннадий Петрович**, член-корреспондент РАН, профессор, доктор технических наук, заместитель генерального конструктора, ФГУП «ГНПРКЦ “ЦСКБ-Прогресс”», г. Самара. E-mail: [csdb@samspace.ru](mailto:csdb@samspace.ru). Область научных интересов: дистанционное зондирование Земли, методы обработки информации дистанционного зондирования Земли.

**Журавель Юлия Николаевна**, начальник сектора, ФГУП «ГНПРКЦ “ЦСКБ-Прогресс”», г. Самара. E-mail: [csdb@samspace.ru](mailto:csdb@samspace.ru). Область научных интересов: дистанционное зондирование Земли, методы обработки изображений.

**Федосеев Александр Андреевич**, инженер-конструктор второй категории, ФГУП «ГНПРКЦ “ЦСКБ-Прогресс”», г. Самара. E-mail: [csdb@samspace.ru](mailto:csdb@samspace.ru). Область научных интересов: дистанционное зондирование Земли, транспортные системы.

**Anshakov Gennady Petrovich**, Doctor of Engineering, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Professor, Deputy General Designer of Space Rocket Center “TsSKB-Progress”, Samara, Russian Federation. E-mail: [csdb@samspace.ru](mailto:csdb@samspace.ru). Area of Research: Earth Remote Sensing, Methods of Processing Remote Sensing Information.

**Zhuravel Yuliya Nikolaevna**, Head of Sector, Space Rocket Center "TsSKB-Progress", Samara, Russian Federation. E-mail: [csdb@samspace.ru](mailto:csdb@samspace.ru). Area of Research: Earth Remote Sensing, Methods of Processing Remote Sensing Information.

**Fedoseev Alexander Andreevich**, Design Engineer, Space Rocket Center "TsSKB-Progress". E-mail: [csdb@samspace.ru](mailto:csdb@samspace.ru). Area of Research: Earth Remote Sensing, Transport Systems.