

Методика формирования спектральных характеристик объектов на основе мультिवременных данных космической гиперспектральной съемки

А.Н. Григорьев

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: Grig-AN@ya.ru*

Работа содержит описание методики обработки мультिवременных данных космической гиперспектральной съемки. Методика позволяет получить наборы спектральных характеристик объектов подстилающей поверхности. Для демонстрации методики используется ряд гиперспектральных снимков территории г. Санкт-Петербург. В статье приведены характеристики условий регистрации гиперспектральных снимков. В статье выполнена постановка задачи исследования по разработке автоматизированной эффективной методики на основе современных программных средств. В основу методики положено использование пространственно согласованных снимков, характеризующихся высокой однородностью по факторам регистрации. Описание методики представлено в виде схемы с основными процедурами обработки. Выделены этапы обработки, посвященные геометрической и атмосферной коррекции, работе с масками облачности. Введено понятие мультिवременной маски облачности. Маска представляет результат объединения отдельных масок и используется при выборе исследуемых объектов. Приведены частные результаты обработки гиперспектральных данных. Они содержат наборы спектральных характеристик для нескольких классов объектов природного и антропогенного происхождения. Автором выполнен анализ полученных результатов. Для количественного оценивания близости спектральных характеристик использован подход на основе вычисления дистанции Махаланобиса. Оценки близости продемонстрировали возможность отделения объектов с выраженной сезонной динамикой от объектов со стационарными во времени свойствами.

Ключевые слова: спектральная характеристика, мультिवременные данные, гиперспектральная съемка, атмосферная и геометрическая коррекция, маска облачности.

Введение

Продолжительная эксплуатация космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с оптической бортовой специальной аппаратурой позволяет формировать наборы данных, согласованных в пространственном и спектральном отношении, что достигается использованием некоторой серии КА (например, программа Landsat) или космических средств ДЗЗ с длительным сроком активного существования. На практике является возможным получение мультिवременных данных, зарегистрированных как уже ставшими традиционными космическими панхроматическими и многоспектральными средствами, так и достаточно «молодыми» гиперспектральными приборами. Ярким примером является аппаратура Hyperion на МКА EO-1 (Earth Observing-1), запущенном NASA в рамках программы «Новое тысячелетие» и позволяющем получать снимки в более, чем 200 спектральных каналах со спектральным разрешением порядка 10 нм и с пространственным разрешением 30 м в полосе захвата 7,5 км. Анализ обширного архива данных Hyperion показал, что на его основе можно получить мультिवременные снимки для одного участка местности. Существенным и объективным фактором, сокращающим объемы мультिवременной выборки, является наличие облачности над наблюдаемой территорией. Например,

для г. Санкт-Петербург доступны гиперспектральные снимки системы EO-1/Hyperion в количестве 30 шт. за период с мая 2011 г. по сентябрь 2013 г. Частный набор изображений малооблачных мультивременных снимков г. Санкт-Петербург приведен на *рис. 1*, а основные параметры условий их регистрации указаны в *табл. 1*.

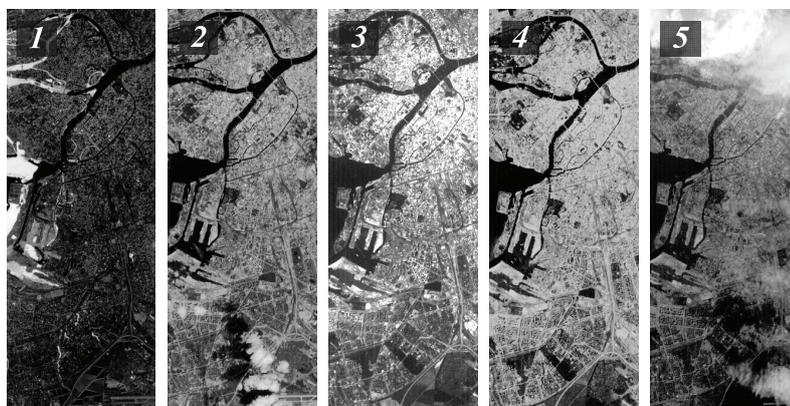


Рис. 1. Фрагменты мультивременных снимков (г. Санкт-Петербург, EO-1 / Hyperion / 550 нм; 1 – 05.04.2012, 2 – 09.05.2012, 3 – 29.07.2012, 4 – 20.08.2011, 5 – 10.09.2011)

Таблица 1. Условия регистрации мультивременных снимков территории г. Санкт-Петербург

<i>Параметры условий регистрации</i>	<i>Первый снимок (апрель)</i>	<i>Второй снимок (май)</i>	<i>Третий снимок (июль)</i>	<i>Четвертый снимок (август)</i>
Дата регистрации	05.04.2012	09.05.2012	29.07.2012	20.08.2011
Широта и долгота центра снимка	59°31'10,10"N 30°06'42,03"E	60°26'23,86"N 30°32'39,72"E	59°29'25,95"N 30°04'58,77"E	59°27'01,19"N 30°05'37,83"E
Время регистрации	08:45:19	08:47:03	08:43:52	08:43:47
Отклонение линии визирования, град	-5,24	-2,36	-3,44	-11,35
Покрывтие облачностью, баллы	1	4	1	3
Азимут Солнца, град	156,87	156,42	151,54	154,42
Высота Солнца, град	34,43	45,77	46,18	40,45

Указанные условия регистрации мультивременных снимков (*табл. 1*) демонстрируют их высокую согласованность по пространственным и временным параметрам. Ряд отличий в условиях регистрации наблюдается вследствие воздействий элементов внешней среды: атмосферы Земли и Солнца. Здесь естественными являются более низкие высоты Солнца для весенних и осенних данных и незначительные вариации в азимутах Солнца. Также наблюдается значительный разброс значений отклонения линии визирования сенсора от направления в надир, что определяется ориентацией КА в периоды выполнения съемки. Имеющиеся отличия в условиях регистрации отчасти определяют различия в освещенности подстилающей поверхности, что в совокупности с разной ориентацией носителя приводит к изменениям освещенности приемника излучения в фокальной плоскости сенсора.

Постановка задачи исследования

Приведенный пример демонстрирует наличие возможности получения качественных наборов мультिवременных гиперспектральных данных для отдельных территорий, что представляет интерес с позиции задачи по анализу сезонных изменений спектральных отражательных свойств объектов подстилающей поверхности, носящей фундаментальный характер. Отдельные результаты по обработке и анализу мультिवременных гиперспектральных данных представлены в публикациях (Григорьев, Шилин, 2012, 2013), в которых также были сформулированы проблемные вопросы решения данной задачи. Сложность интерпретации материалов космической гиперспектральной съемки обусловлена разнородностью рассматриваемых многомерных данных ДЗЗ, вызванной комплексом внешних и внутренних условий регистрации изображений спектральных каналов. Внешние условия регистрации данных отвечают за факторы разнородности, определяемые свойствами среды функционирования системы ДЗЗ (фоноцелевая обстановка, атмосферные явления, топография и т.д.), а внутренние условия формируют факторы, задаваемые особенностями построения системы и бортовой аппаратуры (пространственные условия регистрации, геометрические, радиометрические, спектральные характеристики и т.д.).

Основной существующей трудностью является отсутствие отработанной методики формирования спектральных характеристик объектов на основе мультिवременных данных космической гиперспектральной съемки. Методика должна на высоком уровне автоматизации обеспечивать повышение однородности исходных материалов по ряду критичных факторов (геометрическим и радиометрическим свойствам) с сопутствующим анализом пространственного распределения облачности во времени и последующей тематической обработкой. Методика основывается на применении современных средств системной обработки аэрокосмических снимков, в данной работе – программного комплекса ERDAS Imagine. В качестве исходных гиперспектральных снимков использовались данные системы ДЗЗ EO-1 / Hyperion.

Этапы обработки мультिवременных космических гиперспектральных данных

Анализ опыта отечественных и зарубежных ученых в области обработки гиперспектральных данных и ряд собственных решений позволили разработать и реализовать методику формирования спектральных характеристик объектов на основе мультिवременных данных космической гиперспектральной съемки. Связь основных процедур обработки и получаемые (в т.ч. промежуточные) результаты представлены на *рис. 2*.

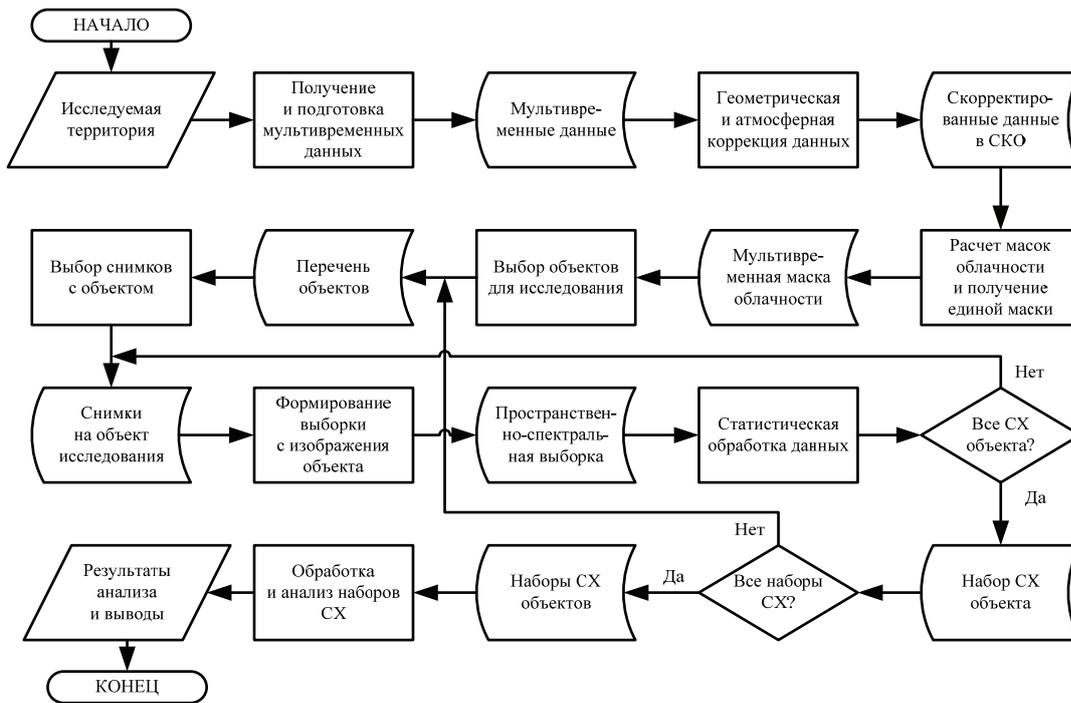


Рис. 2. Блок-схема методики формирования спектральных характеристик объектов на основе мультитременных данных космической гиперспектральной съемки

Геометрическая и атмосферная коррекция

Выполнение методики начинается с определения интересующей территории и получения выборки мультитременных данных. Снимки из выборки подвергаются традиционным процедурам предварительной подготовки, направленным на преобразование их в удобный для последующих действий формат. Необходимость процедуры геометрической коррекции обуславливается наличием существенных линейных невязок между координатами объектов на снимке и их абсолютными координатами. Пример оценок фактических линейных невязок набора изображений (рис. 1) представлен на рис. 3, где в качестве контрольной точки выбран Тучков мост (г. Санкт-Петербург).

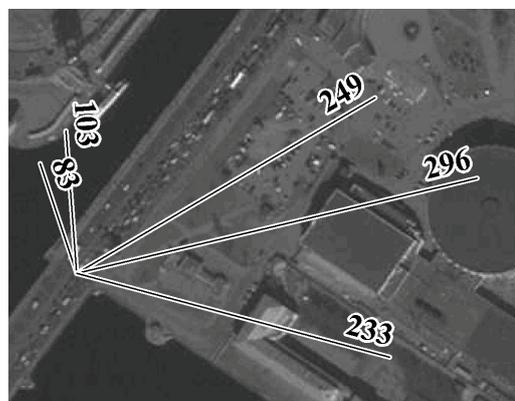


Рис. 3. Линейные невязки изображений снимков Hyperion (ед. изм. – м, подложка – ортотрансформированный снимок Orbview-3 / PAN / 07/05/2006)

Процедура атмосферной коррекции служит для преобразования исходных снимков к физическим характеристикам объектов – спектральным коэффициентам отражения (СКО) с компенсацией атмосферных явлений (рассеивание, поглощение). В представленной работе использовался модуль атмосферной коррекции ATCOR2 ERDAS Imagine, включающий модель атмосферы Modtran[®]5 (ATCOR for Erdas IMAGINE, 2011). Исходные данные для запуска модуля в полном объеме содержатся в стандартных метаданных снимков Nuregion. В процессе выполняемой атмосферной коррекции при приведении данных к СКО выполняется их нормализация по отношению к различиям условий регистрации в момент съемки: отклонений линии визирования сенсора от направления в надир, азимутов Солнца и высот стояния Солнца над плоскостью местного горизонта.

Таким образом, вследствие выполняемой первичной и предварительной обработки мультитременных снимков, включающей процедуры геометрической и радиометрической калибровки и коррекции, производится повышение однородности данных по внешним и внутренним условиям их регистрации. Соответственно наблюдаемые во времени вариации спектральных отражательных свойств объектов будут определяться их изменениями, а не различиями в условиях их регистрации. Для объектов с неизменными во времени свойствами вариации СХ должны быть незначительны и могут быть вызваны факторами системной или случайной природы, неучтенными в методике обработки мультитременных данных.

Работа с масками облачности

Одной из проблем оптического ДЗЗ является наличие нестационарной помехи – облачности. Данная проблема еще больше усугубляется при работе с мультитременными данными, т. к. объект, отдешифрованный на одном из снимков, может быть под облаками на другом. Визуальная проверка присутствия облачности возможна, но является объективно трудоемкой при больших объемах исследований. Существуют подходы к пространственному оцениванию качества данных ДЗЗ по наличию облачности посредством вычисления масок облачности (Барталев, Лупян, 2013), в т.ч. и для данных Nuregion (Griffin et al., 2005). Для решения данной задачи предлагается подход с построением мультитременной маски облачности, представляющей собой бинарное изображение. Механизм получения мультитременной маски основывается на вычислении отдельных масок облачности для каждого снимка с последующим их объединением посредством арифметико-логической операции – дизъюнкции над неограниченным числом операндов (*рис. 4*).

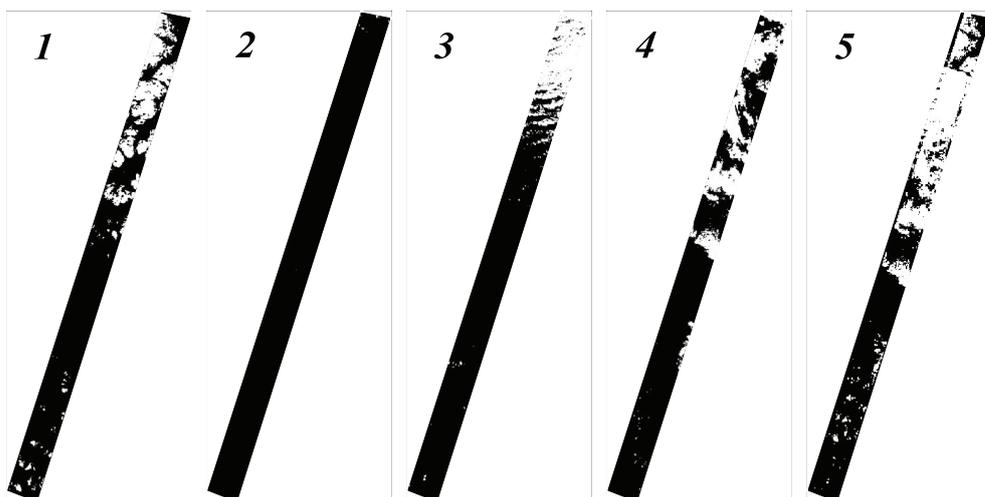


Рис. 4. Построение мультитременной маски облачности по данным Hyperion (1-4 – отдельные маски облачности, 5 – мультитременная маска облачности)

Получение спектральных характеристик объектов

Наличие мультитременной маски для некоторого набора снимков позволяет очень удобным образом выбирать целевые объекты для получения их спектральных характеристик в различные отсчеты времени, соответствующие моментам времени регистрации материалов. В соответствии с перечнем интересующих объектов по всем мультитременным снимкам формируется пространственно-спектральная выборка, представляющая собой содержащий изображение объекта фрагмент гиперспектрального снимка. Более подробно аспекты формирования пространственно-спектральной выборки и ее статистической обработки рассмотрены в литературе (Григорьев, Шилин, 2012).

Полигон выборки с изображения объекта, сформированный по одному из мультитременных снимков, может автоматически использоваться и для остальных, так как для всех снимков предварительно произведена геометрическая коррекция, и извлечение фрагмента снимка будет правильно выполнено по всем изображениям. В результате пользователь получает ряд наборов СХ по числу объектов в перечне. Примеры наборов СХ для объектов с территории г. Санкт-Петербург и Ленинградской области приведены на *рис. 5–8*. На *рис. 5* в качестве объекта выступает луговая растительность в окрестностях дер. Пикколово (27 км юго-западнее г. Санкт-Петербург). Набор СХ отражает четкую сезонную динамику СХ луговой растительности, максимум развития которой приходится на август.

На *рис. 6* приведен пример полученного набора СХ для древесной растительности, представленной участком Южного таицкого леса (35 км юго-западнее г. Санкт-Петербург). Данные графики также иллюстрируют сезонную изменчивость спектральных свойств древесной растительности, отражая максимум развития в июле.

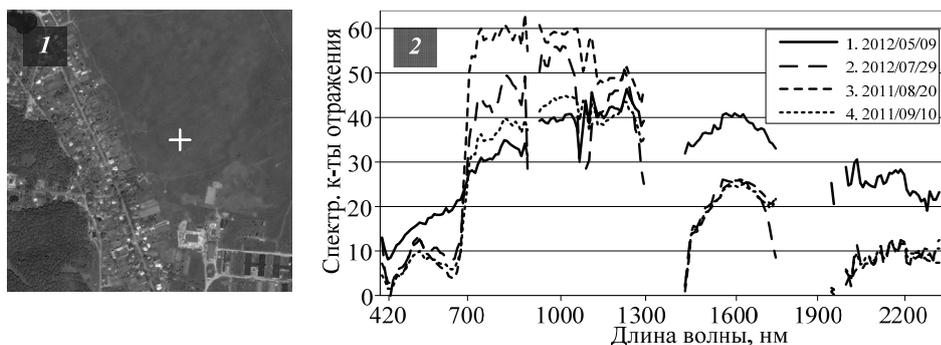


Рис. 5. Объект исследования – луговая растительность
(1 – центр выборки, 2 – набор СХ)

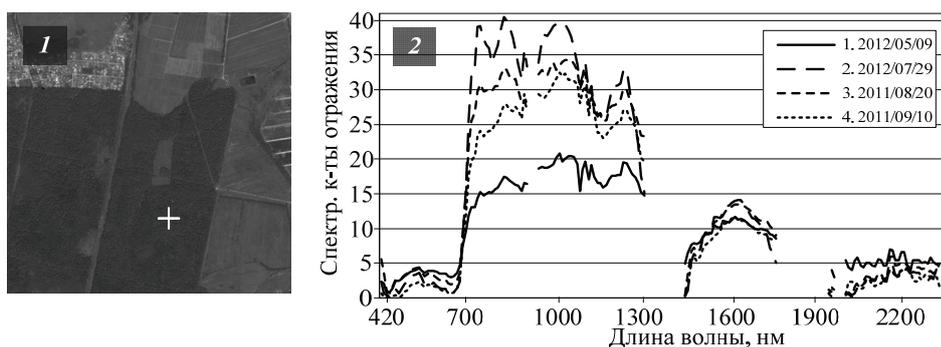


Рис. 6. Объект исследования – древесная растительность
(1 – центр выборки, 2 – набор СХ)

Примеры исследования объектов антропогенного происхождения представлены на рис. 7, 8. Изображение участка подстилающей поверхности с асфальтовым покрытием (рис. 7) на территории о. Гладкий (порт г. Санкт-Петербург) позволило сформировать набор СХ, демонстрирующий отсутствие сезонной изменчивости по сравнению с наборами СХ растительности на рис. 5 и 6.

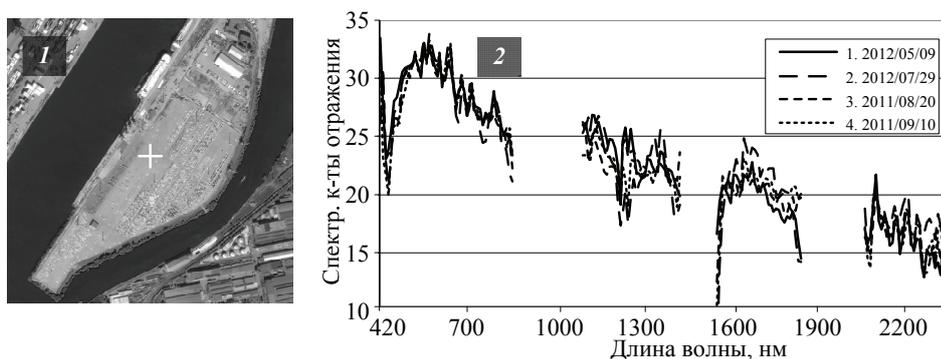


Рис. 7. Объект исследования – асфальтовое покрытие
(1 – центр выборки, 2 – набор СХ)

Аналогичным примером отсутствия явной сезонной динамики спектральных отражательных свойств антропогенных объектов является набор СХ (рис. 8), полученный по изображению крыши сооружения складского комплекса в районе аэропорта Пулково.

Приведенный анализ наличия сезонной изменчивости объектов подстилающей поверхности по виду их СХ основан на визуальном анализе и, естественно, носит субъективный характер. Для подтверждения полученных выводов по объектам различного происхождения выполнено попарное количественное оценивание близости массивов значений их СХ во времени по известному показателю – дистанции Махаланобиса. Итоговые результаты оценивания близости СХ приведены в *табл. 2*.

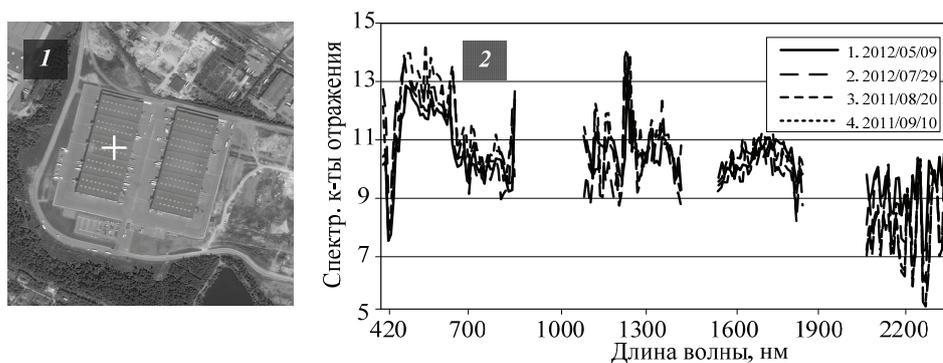


Рис. 8. Объект исследования – покрытие крыши (1 – центр выборки, 2 – набор СХ)

Таблица 2. Дистанция Махаланобиса между СХ исследованных объектов во времени

Объект	Временные интервалы			
	<i>I</i> (апрель – май)	<i>II</i> (май – июль)	<i>III</i> (июль – август)	<i>IV</i> (август – апрель)
Луговая растительность	19 687	7 993	11 180	16 123
Древесная растительность	11 839	1 036	751	4 017
Асфальтовое покрытие	298	368	319	420
Покрытие крыши	154	174	134	205

Согласно данным в *табл. 2*, изменения дистанции Махаланобиса для объектов, характеризующихся сезонной динамикой, носят сильно выраженный характер, что проявляется не только в высоких интервальных значениях дистанции, но и при сравнении значений из разных временных интервалов. Имеют место изменения значений дистанции между интервалами в периоды активной вегетации не только в разы, но и на порядки. Например, для растительности наиболее показательным в рассмотренном случае является сравнение дистанций за интервалы «апрель – май» и «май – июль». Луговая растительность демонстрирует уменьшение дистанции между СХ в 2,46 раза, а древесная – в 11,42 раза. Выполненное количественное оценивание в некоторой степени демонстрирует связь с выводами о максимумах развития разных видов растительности: для луговой в августе, для древесной в июле. Для данных интервалов наблюдается наибольшее значение дистанции Махаланобиса при условии исключения временных интервалов, затрагивающих периоды

отсутствия вегетации: «апрель – май» и «август – апрель». Но эти выводы носят характер первого приближения и, конечно, требуют проведения экспериментов с более высоким временным разрешением.

Для объектов, не обладающих изменчивостью во времени, дистанции Махаланобиса имеют место, но носят умеренный характер и близки по значениям между различными временными интервалами. Наличие дистанций объясняется нестабильностью передаточных звеньев системы регистрации гиперспектральных снимков, функционирующей в сложных нестационарных условиях орбитального полета и вносящей шум случайной природы, а также может отчасти определяться несовершенством процедур обработки по повышению однородности данных гиперспектральной съемки.

Выводы

Полученный опыт использования методики формирования спектральных характеристик объектов на основе мультिवременных данных космической гиперспектральной съемки, разработанный с применением современных аппаратно-программных средств комплексной обработки данных ДЗЗ, подтвердил стационарность спектральных свойств антропогенных объектов и компонентов неживой природы, а также позволил выявить комплексную динамику сезонных изменений объектов различных видов растительности. Представленная методика может использоваться в обработке мультिवременных данных много- и гиперспектральной съемки с космических и воздушных носителей при решении задач, связанных с анализом зависимостей спектральных свойств объектов от времени года и состояния окружающей среды.

Литература

1. *Барталев С.А., Лупян Е.А.* Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т.10. № 1. С.197–214.
2. *Григорьев А.Н., Шилин Б.В.* Фенологические и статистические аспекты обработки данных космического видеоспектрометра HYPERION // Сб. трудов X Междунар. конф. «Прикладная оптика–2012». – СПб.: ГОИ, 2012. С. 148-152.
3. *Григорьев А.Н., Шилин Б.В.* Анализ сезонных изменений спектральных характеристик компонентов ландшафта по данным космического видеоспектрометра Hyperion // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 6. С. 43–47.
4. ATCOR for Erdas IMAGINE. User Manual. GEOSYSTEMS GmbH. Germering. 2011. 226 p.
5. *Campbell J.B., Wynne R.H.* Introduction to Remote Sensing. N.Y.: Guilford, 2011. 667 p.
6. *Griffin M.K., Hsu S.M., Burke H.K., Orloff S.M. and Upham C.A.* Examples of EO-1 Hyperion Data Analysis // Lincoln laboratory journal. 2005. Vol. 15. № 2. P. 271–298.

The method of formation of objects spectral characteristics on the basis of multitemporal data of space hyperspectral remote sensing

A.N. Grigoriev

Military-Space Academy, Saint-Petersburg, Russia
E-mail: Grig-AN@ya.ru

The article contains a description of the method of processing multitemporal data of hyperspectral remote sensing from space. The method allows to obtain a set of spectral characteristics of underlying surface objects. The method is demonstrated on a number of hyperspectral images of St.-Petersburg area. The article presents the characteristics of the conditions for registration of hyperspectral images. A research problem on the development of automated effective method based on modern software tools is stated. The method uses spatially matching images with high uniformity of registration factors. Description of the method is presented in the form of a diagram showing the main processing procedures. The article highlights the stages of processing dedicated to geometric and atmospheric correction and work with cloud masks. A concept of multitemporal cloud mask is introduced. The mask is the result of combining the individual masks and is used to select investigated objects. Partial results of hyperspectral data processing are presented. They contain a set of spectral characteristics for several object classes of natural and anthropogenic origin. An analysis of the results was performed. For quantitative evaluation of the spectral characteristics proximity, an approach based on calculating the Mahalanobis distance was used. Estimates of the proximity demonstrated the possibility to separate objects with a marked seasonal dynamics from those with stationary time properties.

Keywords: spectral response, multitemporal data, hyperspectral sensing, atmospheric and geometric correction, cloud mask.

References

1. Bartalev S.A., Loupian E.A., Issledovanija i razrabotki IKI RAN po razvitiju metodov sputnikovogo monitoringa rastitel'nogo pokrova (Research and development of SRI RAS of methods development for satellite monitoring of vegetation), *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol.10, No 1, pp. 197–214.
2. Grigor'ev A.N., Shilin B.V., Fenologicheskie i statisticheskie aspekty obrabotki dannyh kosmicheskogo videospektrometra HYPERION (Phenological and statistical aspects of the space imaging spectrometers HYPERION data processing), *Prikladnaja optika–2012 (Applied Optic–2012)*, Proc. X International Conference, Saint-Petersburg: GOI, 2012, pp. 148–152.
3. Grigor'ev A.N., Shilin B.V., Analiz sezonnyh izmenenij spektral'nyh karakteristik komponentov landshafta po dannym kosmicheskogo videospektrometra Hyperion (Analysis of seasonal changes in the spectral characteristics of the landscape components according to the space imaging spectrometers Hyperion data), *Opticheskij zhurnal*, 2013, Vol. 80, No 6, pp. 43–47.
4. *ATCOR for Erdas IMAGINE. User Manual*. GEOSYSTEMS GmbH. Germering, 2011, 226 p.
5. Campbell J.B., Wynne R.H., *Introduction to Remote Sensing*, New York: Guilford, 2011, 667 p.
6. Griffin M.K., Hsu S.M., Burke H.K., Orloff S.M., Upham C.A., Examples of EO-1 Hyperion Data Analysis, *Lincoln laboratory journal*, 2005, Vol. 15, No 2, pp. 271–298.