

Эффективность атмосферных коррекций гиперспектральных снимков Hyperion в регионах с развитым растительным покровом

А.А. Деркачева¹, О.В. Тутубалина²

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Москва, 119991, Россия

¹ der_a@mail.ru, ² olgatut@mail.ru

В статье рассматриваются виды атмосферного влияния, наиболее существенные при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ), и различные методы атмосферной коррекции гиперспектральных снимков: IARR, QUAC, FLAASH, EL. Приводятся результаты применения алгоритмов для снимка EO-1 Hyperion от 27 июля 2013 г. на лесную территорию в центре Кольского полуострова. На основе оценки по полевым данным наиболее эффективным был признан регрессионный алгоритм «эмпирической линии» EL, использующий наземные спектрометрические данные о двух эталонных типах объектов. Даны рекомендации по выбору наземных эталонов: они должны занимать достаточную площадь, быть однородными, обеспечивать достаточный яркостной охват (от темных до светлых объектов) и быть стабильными во времени.

Ключевые слова: гиперспектральные снимки, алгоритмы атмосферной коррекции, наземные спектрометрические данные.

Введение

В настоящее время, в связи с запуском и активным использованием ряда гиперспектральных съемочных систем, разворачиваются работы по созданию наземных библиотек спектральных образов. Одно из направлений их применения – это обеспечение дешифрирования гиперспектральных снимков с космических и авиационных носителей. Для сопоставимости наземных и дистанционных гиперспектральных данных необходимо проводить атмосферную коррекцию получаемых снимков.

Оценка качества работы алгоритмов атмосферных коррекций, представленных в распространенных пакетах обработки космических снимков (ENVI, ERDAS Imagine и др.) проводилась неоднократно. Большинство таких работ посвящено пустынным ландшафтам, где на поверхности находятся открытые грунты или горные породы; для ландшафтов с развитым растительным покровом многие алгоритмы заведомо признаются малоэффективными (Шовенгердт, 2010; Adler-Golden et al., 2007; San, Suzen, 2010; Tuominen, Lipping, 2004; Xu et al., 2008 и др.). Однако именно такие районы составляют более половины нашей страны.

В статье кратко рассматриваются виды атмосферного влияния, наиболее существенные при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ), и различные методы атмосферной коррекции гиперспектральных снимков, приводятся результаты применения некоторых из них для снимков EO-1 Hyperion и дается оценка полученных результатов.

Исследуемая территория и материалы

Регион исследований располагается в южной части Кольского полуострова рядом с озером Экостровская Имандра, и охвачен безоблачным фрагментом гиперспектрального космического снимка Hyperion от 27 июля 2013г. Природные особенности местности включают: почти полное отсутствие открытых грунтов (с учетом разрешения снимка, на нем выделяются только три небольших карьера и федеральная асфальтированная трасса “Кола”); множество водных объектов различной глубины и мутности; лесные и болотные растительные сообщества. Таким образом, более 99% площади региона составляют объекты, создающие неравномерное и изменчивое содержание водяных паров в приземном слое атмосферы.

Материалы, используемые в работе, получены из открытых источников, а так же самостоятельно авторами в ходе полевых работ на указанной территории. Так, снимок системы Hyperion со спутника EO-1 был выполнен летом 2013 г. (27 июля) по заказу авторов, и затем получен через портал EarthExplorer Геологической службы США. Пространственное разрешение системы 30 м, спектральное разрешение около 10 нм, спектральный диапазон от 400 до 2500 нм, однако некоторые каналы зашумлены до полной потери полезного сигнала (Beck, 2003). Использовались спектральные образы объектов, полученные в лабораторных условиях, из открытой спектральной библиотеки ASTER Spectral Library 2.0, а также полученные в 2013 г. в результате собственных измерений объектов из региона исследования спектрорадиометром ASD FieldSpec 3 Hi-Res. Для уточнения параметров атмосферной коррекции использовались полевые спектральные образы, измеренные тем же спектрорадиометром в июле 2014 г. методом бесконтактных измерений биогенных и абиогенных объектов в естественном виде в регионе, охваченном гиперспектральным снимком. Так как на спектральный образ растительности сильное влияние оказывает фенологическая стадия её развития, все полевые работы проводились в момент, близкий к дате съемки системой Hyperion.

Влияние атмосферы на данные ДЗЗ и подходы к его коррекции

В контексте дистанционного зондирования Земли в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне влияние атмосферы на световые волны выражается в несовпадении величин отраженной солнечной радиации, измеренных на Земле и зафиксированных на снимке для объектов одного типа. Главных факторов, вызывающих на снимке искажения величин спектральной энергетической яркости (СПЭЯ) и коэффициента спектральной

яркости (КСЯ), два: это поглощение молекулами газов и рассеяние различных видов. Сила этих эффектов меняется для разных частей электромагнитного спектра.

Поглощение излучения – это преобразование в атмосфере части энергии электромагнитного излучения во внутреннюю энергию поглощающих молекул. Его степень зависит от содержания основных поглощающих газов – паров воды, углекислого газа и озона – и сильно различается на разных длин волн. Именно оно в значительной мере определяет так называемые «окна прозрачности атмосферы», за пределами которых ДЗЗ не ведется.

Рассеяние излучения – это его отклонение от первоначального пути. Оно разделяется на три типа, в зависимости от размера рассеивающих частиц, и с разной силой проявляется в различных частях спектра. *Рэлеевское рассеяние* происходит на крупных молекулах газов (преимущественно кислорода, азота и озона) и мелкодисперсных аэрозолях; сильнее всего оно проявляется в фиолетовой и синей части видимого спектра. Мелкие капли воды, частицы дыма, пыли и морских солей вызывают сферическое *Ми-рассеяние*, что приводит к падению контрастности снимков в видимой и ближней инфракрасной части спектра. *Неселективное рассеяние*, сила которого не зависит от длины волны, возникает на крупных водных каплях, частицах льда в облаках, частичках пыли и вызывает значительное ослабление регистрируемого излучения и падение контраста, вплоть до полной блокировки излучения от наземного объекта (Забелин и др., 2011).

Таким образом, атмосферные искажения излучения неодинаковы как в пространстве (в том числе в пределах одного снимка), так и на разных длинах волн. Для их полного устранения на конкретном снимке необходимо знать пространственное распределение, концентрации, типы газов и аэрозолей над территорией в момент съемки. В этом случае используют *физические алгоритмы* атмосферной коррекции снимков, которые основаны на физических моделях переноса излучения в атмосфере, оценивают ряд параметров состояния слоя атмосферы с учетом географического положения территории и данных натурных метеонаблюдений в момент съемки для восстановления значения спектральной энергетической яркости поверхности, соответствующей каждому пикселу снимка. Для использования физических алгоритмов необходимо иметь численные значения некоторых параметров атмосферы в момент съемки в регионе. В числе программных реализаций таких алгоритмов модели FLAASH, ATCOR, 6S, MODTRAN и др. (Kawishwar, 2007).

Трудности в обеспечении подспутниковых данных о состоянии атмосферы привели к разработке ряда альтернативных *эмпирических алгоритмов* атмосферных коррекций снимков. Они используют гистограмму распределения яркостей снимка, эмпирические константы и зависимости; их типичные требования - разнообразие типов объектов (материалов) на снимке, отсутствие доминирующего типа объектов и значительная доля от-

крытых грунтов. Достоинство эмпирических алгоритмов состоит в простоте использования: часто не требуется никаких данных, помимо снимка. Сюда относятся такие алгоритмы, как вычитание темного объекта (DOS - Dark Object Subtraction), однородное поле (FF - Flat Field), средняя относительная отражательная способность (IARR - Internal Average Relative Reflectance), быстрая атмосферная коррекция (QUAC - Quick Atmospheric Correction) (Adler-Golden et al., 2007). Отдельно стоит выделить алгоритм, не основанный на восстановлении процесса прохождения сигнала через атмосферу, но требующий наземных данных. Это алгоритм «эмпирической линии» (EL - Empirical Line). При наличии наземных или лабораторных спектрометрических данных для темных и светлых объектов, занимающих достаточную площадь на снимке (хотя бы несколько пикселей), строится регрессионная модель пересчета спектральных яркостей для всего изображения (Exelis Visual Information Solutions, 2014).

Применение алгоритмов и оценка результатов

После рассмотрения теоретических основ работы различных алгоритмов атмосферной коррекции было отобрано несколько из них, представляющих различные подходы к восстановлению сигнала. Критериями отбора являлись либо ожидание наиболее приемлемых результатов коррекции (FLAASH, EL), либо доступность алгоритма для рядового пользователя, не имеющего углубленных знаний в данной области и дополнительных подспутниковых данных (IARR, QUAC). Для алгоритмов, не имеющих точных значений параметров или имеющих параметры, подлежащие выбору, проводилось несколько серий обработки и выбирался наилучший результат. При оценке результатов использовались наземные спектральные образы растительных видов и их сочетаний, воды, грунтов; внимание уделялось не только точности восстановления наземных спектров объектов, но и уровню шумов в итоговом изображении, так как это определяет возможность дальнейшего автоматизированного дешифрирования снимков и географического анализа.

Как и ожидалось для коррекций IARR и QUAC, их результаты плохо соответствовали наземным эталонам. Не восстановилась форма спектральной кривой в синей и зеленой частях спектра, соотношение величин КСЯ в различных частях спектра также было неверным (рис. 1). Возможно, для снимков на территории, хотя бы наполовину занятых открытыми грунтами ситуация будет более приемлемой; однако для территорий с доминированием растительного покрова их следует признать полностью непригодными.

Результат коррекции по алгоритму FLAASH так же был признан неудовлетворительным. Несмотря на помощь в подборе параметров атмосферы метеорологов, хорошо

знающих данный район и имеющих стационар недалеко от территории исследований, откорректированное изображение также имеет неверную форму кривой в голубой и зеленой частях спектра и неверные соотношения КСЯ в разных частях спектра (рис. 1). Кроме того, результирующие данные очень сильно зашумлены в дальней инфракрасной части спектра – там практически полностью исчезает полезная составляющая сигнала (рис. 2).

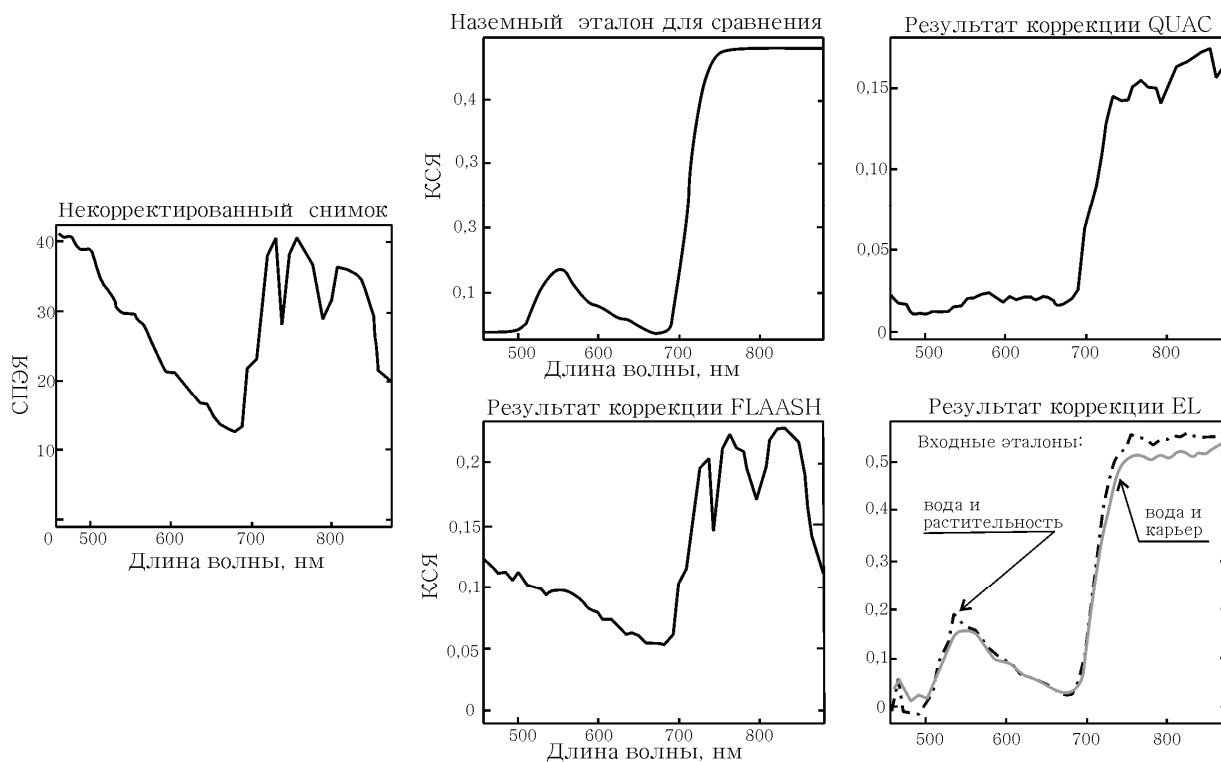


Рис. 1. Фрагмент графика СПЭЯ для участка, покрытого зеленой растительностью на некорректированном снимке, и КСЯ после коррекции по разным алгоритмам

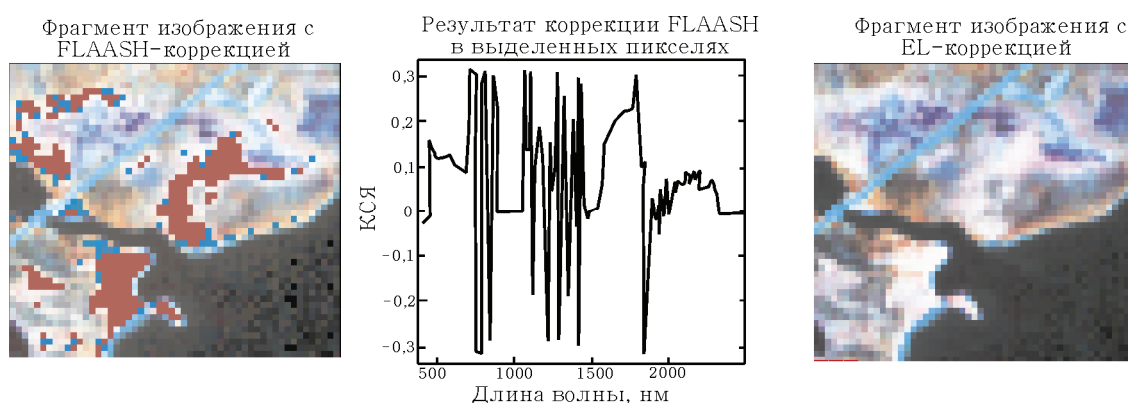


Рис. 2. На изображении FLAASH-коррекции красным цветом выделены пиксели, теряющие спектральную информацию в результате зашумления (спектральная кривая представлена в центре). При коррекции по методу EL такого эффекта не возникает

По совокупности параметров наиболее перспективным в свете дальнейшего использования скорректированного изображения был признан алгоритм EL. В качестве на-

земных эталонов были опробованы два набора объектов: вода и светлый грунт (наибольший яркостной охват, но спектры подобраны из лабораторных библиотек и не относятся к данной местности); вода и растительность (меньший охват яркостей, но растительный эталон измерен на местности). Оба варианта показали наилучшие результаты по сравнению с другими алгоритмами – была верно восстановлена общая форма спектральных кривых для всех трех принципиальных типов объектов на снимке (вода, грунты, растительность). Однако проблема недостаточной коррекции величин КСЯ в некоторых частях спектра сохранилась (рис. 1).

Проведение экспедиционных работ в 2014 г. на исследуемой территории позволило собрать наземные спектрометрические данные целенаправленно для атмосферной коррекции. При повторном проведении коррекции по алгоритму EL и оценке ее результатов использовались исключительно результаты бесконтактных измерения объектов в пределах территории снимка – песка из строительного карьера, воды в глубокой протоке оз. Имандра, болотных и лишайниковых растительных сообществ. В итоге были получены очень хорошие результаты по всем трем важным параметрам оценки – форме спектральной кривой, соотношению значений в различных частях спектра, зашумленности данных. Примеры эталонных спектральных кривых и полученных в результате коррекции представлены на рис. 3.

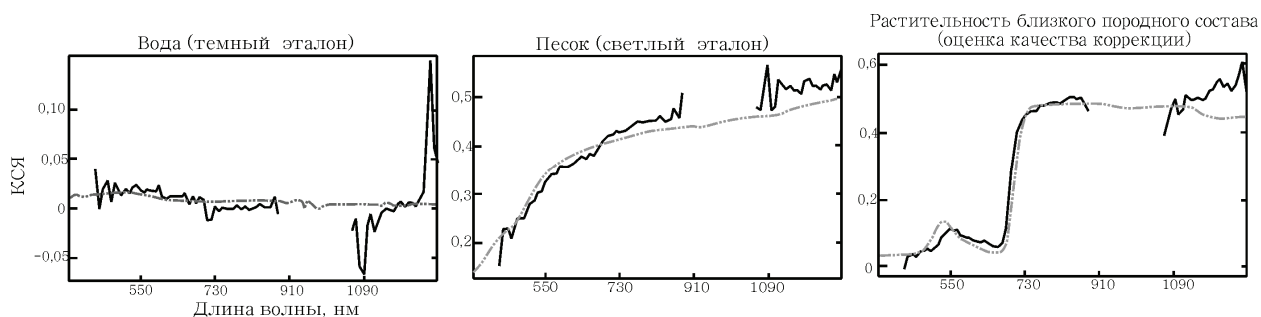


Рис. 3. Спектральные кривые объектов на откорректированном снимке (черная линия) и по данным наземных бесконтактных измерений (серый пунктир)

Рекомендации по выбору наземных эталонов для коррекции по алгоритму эмпирической линии EL

Наземные эталоны для проведения коррекции EL должны занимать достаточную площадь, соответствующую, как минимум, нескольким пикселям на снимке; при этом, если они однородны, на земле могут быть измерены меньшие площади. Кроме того, они должны обеспечивать достаточный яркостной охват (от темных до светлых объектов) для

корректного определения регрессионных зависимостей и быть стабильными во времени, поскольку наземные измерения редко проводятся синхронно со съемкой.

Глубокие незамутненные озера обычно являются самыми темными объектами на снимке. Однако их спектральные образы сложно восстанавливать из-за неравномерного распределения водяного пара над их поверхностью. Из наиболее светлых объектов распространены бетонированные площадки, природные выходы светлых грунтов, карьеры и отвалы. Помимо того, что абиогенные объекты охватывают наибольший размах яркостей снимка, они отличаются слабой динамикой во времени, и это позволяет использовать как эталоны их наземные спектральные образы, полученные не во время спутниковой съемки (с разрывом до нескольких лет).

Растительность, особенно северная, имеет очень динамичную отражательную способность из-за фенологического развития. Даже небольшой временной промежуток между наземной и космической съемкой приведет к различиям спектров. Для лесов дополнительной проблемой является геометрия кроны, которая может существенно менять спектральный образ для пиксела снимка по сравнению с наземным эталоном. Объекты растительности нужно использовать для коррекции только в крайних случаях при отсутствии открытых грунтов, тщательно подбирая наземный эталон и соответствующие ему пиксели снимка.

Заключение

Атмосферная коррекция космических гиперспектральных снимков на данный момент является существенной проблемой для рядовых потребителей данных ДЗЗ, имеющих доступ только к стандартным инструментам в программных пакетах. Выполнить ее качественно без привлечения дополнительных источников информации возможно только для пустынных и полупустынных регионов. Если же существенную долю снимка занимает растительность, необходимо привлекать, например, наземные спектрометрические данные.

Однако, при наличии таких данных возможно получение хороших результатов коррекции. Их тщательный подбор позволяет использовать не синхронные со съемкой измерения для ландшафтов высокой сложности, что показано с использованием экспедиционных данных 2014 г. применительно к снимку за 2013 г. для алгоритма эмпирической линии. Спектральные образы хорошо восстанавливаются по форме графика и по соотношениям значений в различных участках спектра, не возникает избыточной зашумленности, не происходит редуцирования информационного содержания снимка.

Благодарности

Авторы благодарят лабораторию аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ и ее заведующего Ю.Ф.Книжникова за предоставление спектрометрического оборудования; Е.И. Голубеву, М.В. Зимина и У.Г. Риса за консультации и организацию полевых исследований; А.В. Устюхину, Т.М. Гизатулина, С.А. Буторину, А.М. Трофайер и З. Звирад за помощь в сборе полевых данных. Исследования поддержаны проектом РФФИ 13-05-12061 офи-м, проектом Spectral Library of Arctic Plants международной программы ЕС INTERACT, а также грантом Президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ НШ-2248.2014.5 и Программой развития МГУ до 2020 г.

Литература

1. С.А. Забелин, А.Д. Тулегулов Методика атмосферной коррекции снимков Landsat // Вестник ЕНУ им. Л.Н.Гумилева. Астана. 2011 (6). стр.147-154.
2. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. Москва: Техносфера, 2010. 560 с.
3. Adler-Golden S., Bernstein L., Matthew M. Atmospheric compensation of extreme off-nadir hyperspectral imagery // SPIE, Proceedings, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral and Ultraspectral Imagery XIII. 2007.
4. Beck R. EO-1 User Guide // Version 2.3. Cincinnati, Ohio : Satellite Systems Branch USGS EDS, 2003.
5. Exelis Visual Information Solutions Atmospheric Correction // Exelis VIS. 2014 <http://www.exelisvis.com/>.
6. Kawishwar P. Atmospheric Correction Models for Retrievals of Calibrated Spectral Profiles from Hyperion, India: Dehra Dun, Indian Institute of Remote Sensing, National Remote Sensing Agency, 2007.
7. San B.T., Suzen M.L. Evaluation of different atmospheric correction algorithms for EO-1 Hyperion imagery. //International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. Volume XXXVIII. Part 8. Kyoto, 2010. P. 392-397.
8. Tuominen J., T. Lipping T. Atmospheric correction of hyperspectral data using combined empirical and model based method. Tampere: Tampere University of Technology. 2004.
9. Xu Y., Wang R., Liu Sh., Yang S., Yan B. Atmospheric correction of hyperspectral data using MODTRAN model // Remote Sensing of the Environment: 16th National Symposium on Remote Sensing of China. 2008

The effectiveness of atmospheric correction for Hyperion hyperspectral images in regions with developed vegetation cover

A.A. Derkacheva, O.V. Tutubalina

M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

¹der_a@mail.ru ²olgatut@mail.ru

We review the most significant sources of atmospheric influence in remotely sensed imagery and various algorithms for image atmospheric correction, including IARD, QUAC, FLAASH, and EL. These algorithms are applied to an EO-1 Hyperion image of 27 July 2013 of a forested territory in central Kola Peninsula, north-west Russia. We conclude that the empirical line (EL) regression algorithm, which uses field spectroradiometric data for two signatures, yielded the best results, on the basis of the assessment with other field data. We provide recommendations for choosing ground signature areas: they should be sufficient in area, homogeneous, have sufficient range of spectral radiance values (as a set of signatures in total), be stable over time.

Keywords: hyperspectral images, atmospheric correction algorithms, ground spectroradiometry data.

References

1. Zabelin S.A., Tulegulov A.D., Metodika atmosfernoï korrektsii snimkov Landsat (Technique of atmospheric correction for Landsat imagery), *Vestnik ENU im. L.N.Gumileva*, 2011 (6), pp.147-154.
2. Schowengerdt R.A., *Distantionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazheniy* (Remote sensing: Models and methods for image processing), Moscow: Tekhnosfera, 2010, 560 p.
3. Adler-Golden S., Bernstein L., Matthew M., Atmospheric compensation of extreme off-nadir hyperspectral imagery, *SPIE, Proceedings, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral and Ultraspectral Imagery XIII*, 2007.
4. Beck R. *EO-1 User Guide*, v. 2.3, Satellite Systems Branch USGS EDS, 2003.
5. Exelis Visual Information Solutions, *Atmospheric Correction, Exelis VIS*, 2014. <http://www.exelisvis.com/>.
6. Kawishwar P. *Atmospheric Correction Models for Retrievals of Calibrated Spectral Profiles from Hyperion*, India: Dehra Dun, Indian Institute of remote sensing, National Remote Sensing Agency, 2007.
7. San B.T., Suzen M.L., Evaluation of different atmospheric correction algorithms for EO-1 Hyperion imagery, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Volume XXXVIII, Part 8, Kyoto*, 2010, pp. 392-397.
8. Tuominen J., T. Lipping T., *Atmospheric correction of hyperspectral data using combined empirical and model based method*, Tampere University of Technology, 2004.
9. Xu Y., Wang R., Liu Sh., Yang S., Yan B., Atmospheric correction of hyperspectral data using MODTRAN model, *Remote Sensing of the Environment: 16th National Symposium on Remote Sensing of China*, 2008.