

УДК 528.8

Оценка погрешности расчета NDVI при использовании эмпирических методов учета влияния атмосферы

К. И. Зубкова, Т. Г. Куревлева, Л. И. Пермитина

АО «Российские космические системы»

e-mail: zubkova.k@ntsomz.ru

Аннотация. В данной работе представлены результаты анализа применимости различных методов эмпирической атмосферной коррекции к гиперспектральным данным, получаемым космическими аппаратами «Ресурс-П», с целью расчета NDVI. Рассматриваются и применяются такие методы, как метод плоского поля Flat Field, DOS — вычитание темного фона, DOS-1% — модифицированный метод темного фона, COST с учетом прозрачности атмосферы, а также расчет атмосферно скорректированных значений при помощи формулы Ламберта. Приводится анализ недостатков и достоинств каждого из методов. Сделан вывод, что использование эмпирических методов учета влияния атмосферы позволяет повысить точность расчета индекса NDVI. Наилучшие результаты достигнуты при использовании методов DOS-1% и COST, значения среднего отклонения от эталона не превосходят 5%. Результаты работы могут применяться при решении задач, требующих знания коэффициентов спектральной яркости подстилающей поверхности.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, атмосферная коррекция, гиперспектрометр, спектральная яркость, NDVI

The Estimation of the NDVI Calculation Error when Using Empirical Methods for Atmospheric Correction

K. I. Zubkova, T. G. Kurevleva, L. I. Permitina

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: zubkova.k@ntsomz.ru

Abstract. The paper presents the results of the analysis of different empirical atmospheric correction method applicability to the Resurs-P spacecraft hyperspectral data for the NDVI calculation. The methods such as FF (Flat Field), DOS (Dark Object Subtraction), DOS1% (Improved Dark Object Subtraction), and COST (Cosine Approximation Model with atmospheric transmittance taken into account) as well as the atmospherically corrected value calculation using the Lambert's formula are considered and used. The paper analyses the merits and drawbacks of each method. It is concluded that the empirical methods taking into account the atmospheric effects improve the NDVI calculation accuracy. The atmospheric correction effect of DOS1% and COST is the best; the mean deviation values do not exceed 5%. The results obtained in this study may be applied to solving the problems requiring the knowledge of underlying surface spectral radiance factors.

Keywords: Earth remote sensing, atmospheric correction, hyperspectrometer, spectral radiance, NDVI

Введение

В обеспечение решения тематических задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) требуется знание коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) подстилающей поверхности, рассчитанных по радиометрически калиброванным данным с учетом влияния атмосферы. Проведение точной атмосферной коррекции данных ДЗЗ в ряде случаев невозможно из-за отсутствия полного набора необходимых параметров атмосферы. В связи с этим разработано множество методов эмпирической атмосферной коррекции.

В работе представлены результаты анализа применимости методов DOS (Dark Object Subtraction), COST (Cosine of the Solar Zenith Angle, COS (TZ)), Flat Field (метод плоского поля) и др. [1–3] к гиперспектральным данным, получаемым с российских космических аппаратов (КА) ДЗЗ «Ресурс-П» № 1, 2.

Методы эмпирической атмосферной коррекции

1. Flat Field. Метод подразумевает наличие эталонного объекта, для которого априори известен коэффициент спектральной яркости (КСЯ). Опорный спектр для коррекции определяется как усредненные значения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) на однородном участке поверхности эталонного объекта. КСЯ в каждом пикселе с координатами (i, j) определяется в виде (1):

$$\varrho_{i,j} = \frac{L_{i,j}}{L_{i,j}^{\text{эт}}} \times \varrho_{i,j}^{\text{эт}}, \quad (1)$$

где $L_{i,j}$ — СПЭЯ на верхней границе атмосферы (ВГА), $L_{i,j}^{\text{эт}}$ — усредненный спектр СПЭЯ на ВГА эталона, $\varrho_{i,j}^{\text{эт}}$ — КСЯ на ВГА эталона.

Эталонный участок должен обладать следующими характеристиками:

а) поверхность участка должна быть плоской (близкой к ламбертовой) с целью корректного усреднения значений СПЭЯ;

б) поверхность участка должна быть яркой (например, светлый песок) с целью увеличения соотношения сигнал/шум.

2. Lambertian Reflectance (расчет по формуле Ламберта). В методе расчет КСЯ осуществляется по формуле для ламбертовой поверхности (2):

$$\varrho_k = \frac{\pi L_k}{S_k \cos \Theta_s}, \quad (2)$$

где L_k — СПЭЯ на ВГА, ϱ_k — КСЯ на ВГА, S_k — солнечная постоянная (облученность Солнцем на ВГА в пределах функции спектральной чувствительности канала k), Θ_s — зенитный угол Солнца.

Метод применяется при полном отсутствии знаний об атмосфере над областью интереса [4].

3. DOS (вычитание «темного фона»). Метод предназначен для учета атмосферной дымки. В качестве значения СПЭЯ дымки используется значение темного объекта на подстилающей поверхности. Значение дымки вычитается из СПЭЯ на ВГА, затем выполняется расчет КСЯ на ВГА по формуле (3):

$$\varrho_k = \frac{\pi(L_k - L_{\text{dark}})}{S_k \cos \Theta_s}, \quad (3)$$

где L_k — СПЭЯ на ВГА, ϱ_k — КСЯ на ВГА, S_k — солнечная постоянная для канала k , Θ_s — зенитный угол Солнца, L_{dark} — СПЭЯ темного объекта.

4. Модифицированный DOS. В методе DOS [4, 5] предполагается, что отражения от объекта нет, а вся принятая на зрачок целевой аппаратуры энергия обусловлена наличием атмосферной дымки. Однако в более поздних работах, посвященных атмосферной коррекции, КСЯ темного объекта не считается равным нулю, а значение атмосферной дымки рассчитывается как разность между СПЭЯ темного объекта и СПЭЯ, соответствующей 1–2 % от СПЭЯ темного объекта. После вычитания влияния дымки расчет КСЯ на ВГА выполняется по формуле (4) [4]:

$$\varrho_k = \frac{\pi(L_k - L_{1\%})}{S_k \cos \Theta_s}, \quad (4)$$

где

$$L_{1\%} = \frac{0,01 \cdot S_k \cos \Theta_s}{\pi}, \quad (5)$$

где L_k — СПЭЯ на ВГА, ϱ_k — КСЯ на ВГА, S_k — солнечная постоянная, Θ_s — зенитный угол Солнца, $L_{1\%}$ — СПЭЯ темного объекта.

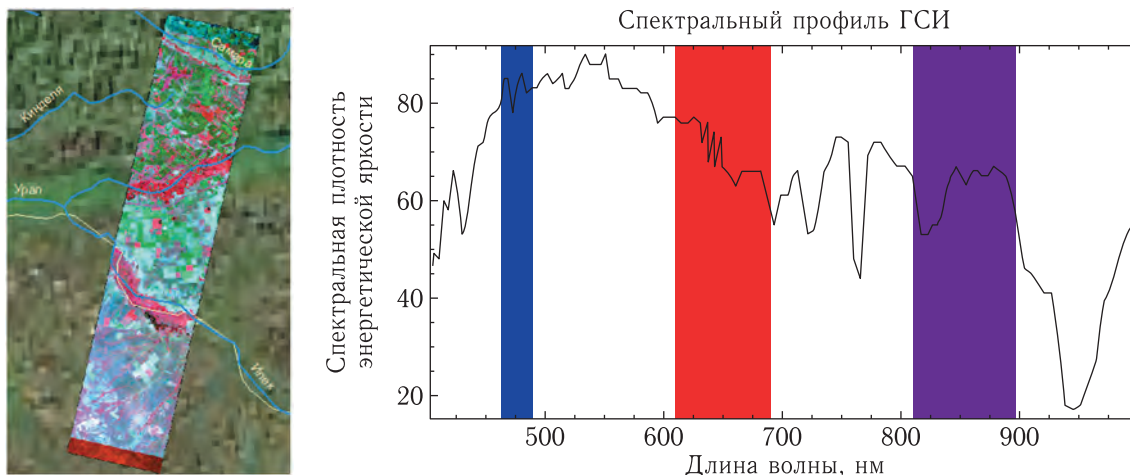


Рис. 1. Данные съемки ГСА (гиперспектральной аппаратуры)/«Ресурс-П» № 1. Синтез каналов 106 (859 нм), 60 (636 нм), 40 (550 нм) (слева) и спектр центральной точки гиперспектральной съемки (справа)

5. **COST.** В этом методе атмосферная дымка рассчитывается точно так же, как и в методе «Модифицированный DOS». Однако, кроме учета атмосферной дымки, метод предполагает эмпирический учет прозрачности атмосферы [4]. Коэффициент прозрачности атмосферы рассчитывается как косинус зенитного угла Солнца и косинус зенитного угла наблюдения со спутника. Первоначально метод применялся только для данных съемки в надир [4], поэтому учитывался лишь косинус зенитного угла Солнца (косинус угла визирования равен единице). В настоящее время расчет КСЯ выполняется по формуле (6):

$$\varrho_k = \frac{\pi(L_k - L_{1\%})}{S_k \cos^2 \Theta_s \cos \Theta_{\text{viz}}}, \quad (6)$$

где L_k — СПЭЯ на ВГА, ϱ_k — КСЯ на ВГА, S_k — солнечная постоянная для анализируемого канала k , Θ_s — зенитный угол Солнца, $L_{1\%}$ — СПЭЯ темного объекта, $\cos \Theta_{\text{viz}}$ — косинус угла визирования.

Описание входных данных для исследования

Исследование выполнено на основе данных гиперспектральной съемки КА «Ресурс-П» № 1 от 16 мая 2014 г. 10:27 ДМВ (07:27 UTC) территории Оренбургской области и данных съемки MODIS КА Terra 18 мая 2014 г., 07:45 UTC (рис. 1).

Данные съемки визуализированы в псевдоцветах, растительность отображается красной, открытая почва — голубой, что обусловлено комбинацией выбранных каналов: ближний ИК, красный и синий.

Кросскалибровка данных

В силу наличия проблем с радиометрической калибровкой гиперспектральных данных [6] исследовать методы атмосферной коррекции на примере узкополосных индексов не представлялось возможным.

Оценка погрешности расчета NDVI выполнена на примере широкополосного NDVI посредством работы с широкими спектральными диапазонами, которые сформированы путем усреднения гиперспектральных каналов в три спектральных диапазона, соответствующих функциям спектральной чувствительности каналов 3, 2, 1 аппаратуры MODIS (см. рис. 1).

В обеспечение получения корректного значения СПЭЯ на ВГА выполнена радиометрическая кросскалибровка данных ГСА по данным MODIS (в виде продукта MOD02 — данные о СПЭЯ подстилающей поверхности). После пространственного совмещения данных выполнено построение ста полигонов на однородных участках поверхности, сопоставлены средние значения СПЭЯ ГСА и MODIS по каждому из полигонов.

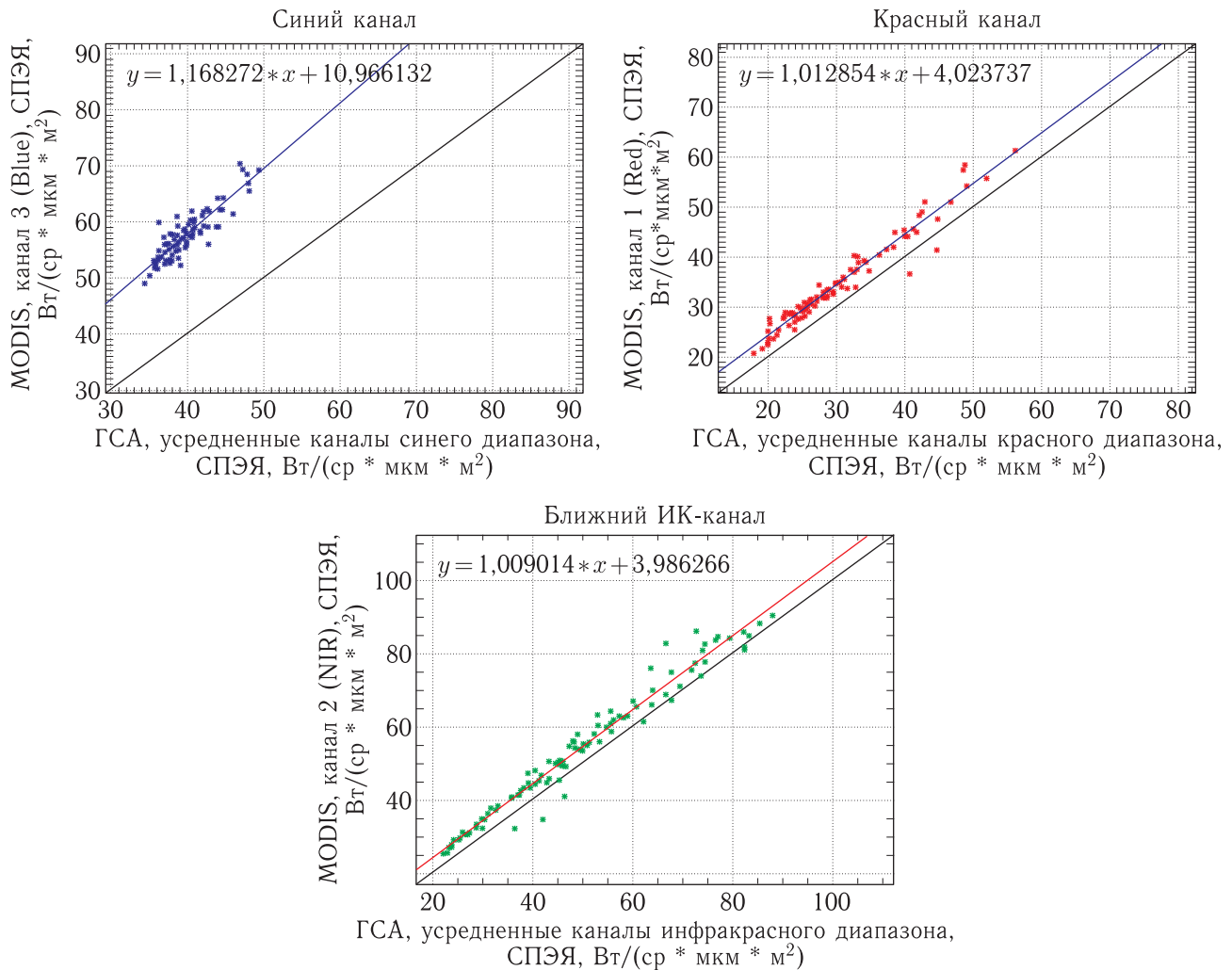


Рис. 2. Сопоставление значений СПЭЯ усредненных каналов ГСА/«Ресурс-П» № 1 (по оси x) и СПЭЯ MODIS КА Terra (по оси y), приведенных к условиям съемки ГСА

Кросскалибровка выполнена по формуле (7):

$$L_R = L_M \frac{S_R}{S_M} \frac{\cos \Theta_{sR}}{\cos \Theta_{sM}}, \quad (7)$$

где L_M , L_R — СПЭЯ MODIS и ГСА соответственно, $\frac{S_R}{S_M}$ — отношение солнечных постоянных (Exoatmospheric Solar Irradiance) для пары каналов, учитывающее различие в ширине и форме функций спектральной чувствительности каналов ГСА и MODIS, $\frac{\cos \Theta_{sR}}{\cos \Theta_{sM}}$ — отношение косинусов зенитного угла Солнца во время съемки, учитывающее рассинхронность съемки.

На рис. 2 представлены результаты кросскалибровки: по оси x отложены значения СПЭЯ ГСА, по оси y — значения СПЭЯ MODIS, приведенные

к условиям съемки ГСА. По итогам кросскалибровки выполнена коррекция значений СПЭЯ в усредненных синем, красном и ближнем ИК-каналах ГСА. Калибровочная функция, соответствующая пересчету СПЭЯ для каждого из трех каналов, представлена в верхней части каждого графика. В дальнейшей работе использованы только калиброванные данные ГСА.

Атмосферная коррекция данных

Атмосферная коррекция усредненных каналов ГСА выполнена после кросскалибровки с помощью программного пакета 6S с учетом следующих параметров:

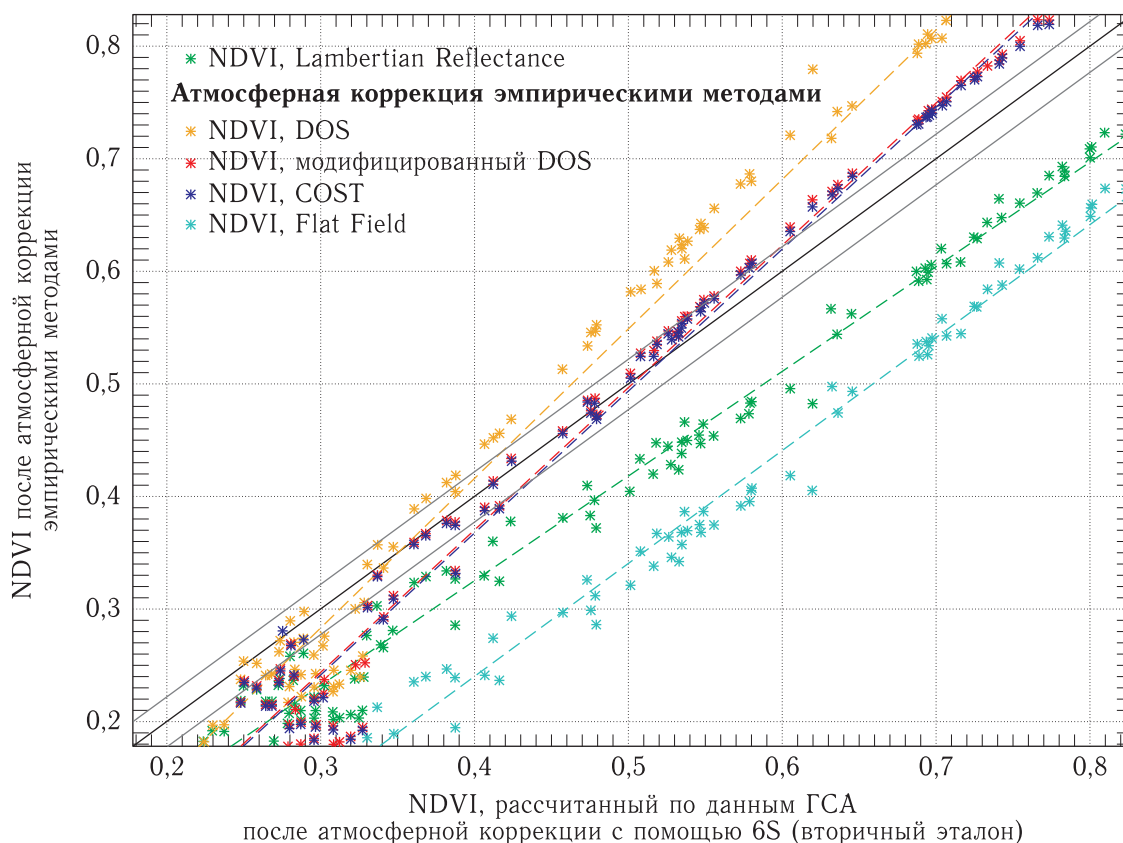


Рис. 3. Сопоставление NDVI, рассчитанных после атмосферной коррекции эмпирическими методами, с эталоном

– модель атмосферы пользовательская, требующая ввода значения общего содержания водяного пара ($2,20 \text{ г/см}^2$) и общего содержания озона (356 DU), данные получены из продукта MOD09 MODIS;

– модель атмосферного аэрозоля континентальная, содержание аэрозоля на длине волны 550 нм (в соответствии с требованием 6S) получено по данным ближайшей станции AERONET в г. Екатеринбурге ($\text{AOT} = 0,13$, AOT (Aerosol Optical Depth) — аэрозольная оптическая толщина атмосферы);

– средняя высота подстилающей поверхности над уровнем моря — 120 м .

Расчет NDVI

После атмосферной коррекции выполнен расчет NDVI, значения которого послужили эталоном при оценке погрешности расчета NDVI эмпирическими методами.

На рис. 3 представлен результат сопоставления значений NDVI, рассчитанных эмпирическими методами, с эталоном — значениями NDVI, рассчитанными после кросскалибровки и атмосферной коррекции данных ГСА. Как и при кросскалибровке, сопоставление NDVI в виде скаттерграмм выполнено для средних значений NDVI на каждом из ста полигонов. На график нанесены также значения NDVI, рассчитанные по формуле (2).

В идеальном случае скаттерграмма значений NDVI должна лежать ровно под углом 45° (вдоль черной линии). Результаты анализа показали, что модифицированный метод DOS дает минимальное отклонение от эталона. В частности, в диапазоне значений NDVI от $0,3$ до $0,6$ среднее отклонение от эталона не превышает 2% . В методе «Модифицированный DOS» значение атмосферной дымки меньше, чем в методе DOS, следовательно, «перекоррекция» значений КСЯ сказывается не так явно, она заметна лишь для малых (до $0,3$) значений NDVI.

В методе COST атмосферная дымка рассчитывается так же, как в методе «Модифицированный DOS», прозрачность атмосферы рассчитывается как косинус зенитного угла и не зависит от длины волны. Следовательно, в расчет NDVI метод COST не вносит дополнительной информации по сравнению с методом «Модифицированный DOS»: константное значение прозрачности атмосферы сокращается.

Большие отклонения от эталонных значений (не менее 20%) дает расчет NDVI по методу Lambertian Reflectance. Однако метод DOS также приводит к значительному относительному отклонению. Это связано с тем, что в ближнем ИК-канале метод DOS приводит к «перекоррекции» значений КСЯ: атмосферная дымка значительно меньше, чем в красном канале, и в вычитаемом значении СПЭЯ, наряду с атмосферной дымкой, содержится доля «полезной» энергии Солнца, отраженной от поверхности.

Использование метода Flat Field привело к отклонению от эталона NDVI более 30%. Прежде всего, это может быть связано с неверным выбором эталонного спектра $\rho_{\text{эт}}$ из библиотеки soils.sli, подготовленной Университетом имени Джона Хопкинса (Brown loamy fine sand, Napulstalf 87P3468): для анализа метода выбран полигон, соответствующий сухой открытой почве, спектр которого впоследствии сравнивался со спектром сухой открытой почвы после атмосферной коррекции данных ГСА. При этом среднее отклонение не зависит от значения NDVI, в отличие от метода «Модифицированный DOS».

В таблице представлены значения среднего отклонения от эталона для каждого из методов эмпирической атмосферной коррекции.

Заключение

В ходе работы определены области применимости эмпирических методов влияния атмосферы при обработке гиперспектральных данных ДЗЗ на основе оценки погрешности NDVI.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

Т а б л и ц а. Значения среднего отклонения от эталона для каждого из методов эмпирической атмосферной коррекции

Название метода	Значение среднего отклонения
Lambertian reflectance	> 20 %
DOS	10–15 %
Модифицированный DOS	В интервале от 0,3 до 0,6 — 3 %, в остальных интервалах — 5 %
COST	В интервале от 0,3 до 0,6 — 3 %, в остальных интервалах — 5 %
Flat Field	> 30 %

1. Использование эмпирических методов атмосферной коррекции приводит к уменьшению погрешности расчета NDVI по сравнению с расчетом без атмосферной коррекции. Результаты с наименьшим отклонением получены с использованием метода «Модифицированный DOS», в котором расчет атмосферной дымки выполняется по «темному» объекту с вычитанием СПЭЯ, соответствующей КСЯ объекта 0,01. В диапазоне значений NDVI от 0,3 до 0,6 отклонение расчета NDVI находится в пределах 0,02, что соответствует номинальному значению погрешности для продукта MOD13Q MODIS, содержащего композиты значений NDVI за десять дней.

2. Метод COST дает такие же результаты, как и метод «Модифицированный DOS», из-за сокращения константного влияния атмосферы.

3. Наибольшее среднее отклонение от эталона, рассчитанного с помощью 6S, продемонстрировал метод Flat Field. Недостатками метода Flat Field являются необходимость выбора оператором упомянутого выше объекта, кроме того, метод непригоден для участков подстилающей поверхности, содержащих только растительность. Тем не менее, метод пригоден для анализа территорий городских поселений, дорог, бетонных конструкций. «Пригоден» в данном контексте означает «использование метода приводит гиперспектральные данные к удобному для анализа виду и существенно повышает точность расчета NDVI» [4]. При сравнении спектров с истинными значениями измерений

на местности погрешности атмосферной коррекции могут быть слишком велики (более 30 %).

4. Дополнительная коррекция значений КСЯ произошла при использовании метода DOS из-за вычитания «полезной» информации в процессе обработки наряду с атмосферным влиянием. В области высоких значений NDVI (больше 0,4) среднее отклонение от эталона составило порядка 20 %.

Наилучшие результаты достигнуты при использовании методов «Модифицированный DOS» и COST. Их применение ограничивается необходимостью наличия на подстилающей поверхности «темных» объектов (водные поверхности, густая растительность или сильно затененные участки).

Список литературы

1. *Lian Shunlin, Hongliang Fang and Mingzhen Chen.* Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery. I. Methods // *Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Transactions on 39.11, 2001. P. 2490–2498.
2. *Ju Junchang et al.* Continental-scale validation of MODIS-based and LEDAPS Landsat ETM+ atmospheric correction methods // *Remote Sensing of Environment* 122, 2012. P. 175–184.
3. *Lu D. et al.* Assessment of atmospheric correction methods for Landsat TM data applicable to Amazon basin LBA research // *International Journal of Remote Sensing* 23.13, 2002. P. 2651–2671.
4. *Pat S. Chavez.* Image-Based Atmospheric Corrections Revisited and Improved // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1996, vol. 62, № 9. P. 1025–1036.
5. *Wooley J. T.* Reflectance and transmittance of light by leaves // *Plant Physiol.*, 1971, vol. 47. P. 656–662.
6. *Гришанцева Л.А., Емельянов К.С., Куревлева Т.Г., Марков В.С.* Проблемы радиометрической калибровки КА ГСА «Ресурс-П» № 1, 2 // *Актуальные проблемы ракетно-космической отрасли*, 2015, № 1. С. 280.