

УДК 528.714

**АТМОСФЕРНАЯ КОРРЕКЦИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ
ДАННЫХ АВИАКОСМИЧЕСКОГО ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ АГРОСИСТЕМ**

А. А. Николенко

Московский физико-технический институт

Статья получена 23 июня 2015 г.

Аннотация. В статье рассматривается один из подходов к атмосферной коррекции гиперспектральных данных авиакосмического дистанционного зондирования агросистем, который основан на комплексном использовании дополнительных данных, получаемых с различных приборов при проведении полевых измерений. В качестве дополнительных данных рассматриваются результаты измерений, проводимых спектрорадиометрами, солнечными фотометрами и т.д. Отмечается целесообразность использования данных сети AERONET. Кроме того при решении целевых задач полезным является наличие информации о навигационной привязке гиперспектральных изображений, а также доступ к снимкам, получаемым с помощью другой видеоаппаратуры. Предложенный в статье подход отработан на примере атмосферной коррекции гиперспектральных изображений территории полигона Почвенного института им. В.В. Докучаева в Тульской области. В ходе экспериментальных работ использовался авиационный гиперспектрометр производства ЗАО "НПО "Лептон" г.Зеленоград. В качестве исходной информации для совместной обработки были выбраны данные наземного спектрометрирования спектрорадиометром ASD FieldSpec(R)3 и данные солнечного фотометра MICROTOPS(R)II. Выявлено, что для проведения атмосферной коррекции наиболее полезны данные солнечного фотометра, из которых выделяются такие ключевые параметры атмосферы, как метеорологическая дальность видимости

и влагосодержание. Показано, что наилучшие результаты достигнуты в полосах поглощения воды и в синей области спектра.

Ключевые слова: гиперспектрометр, спектрорадиометр, солнечный фотометр, сеть AERONET, атмосферная коррекция, тематическая обработка гиперспектральных изображений агросистем.

Abstract. This article presents one approach to atmospheric correction of hyperspectral aerospace remote sensing data, which is based on the integrated use of additional data obtained with different instruments for field measurements. The results of measuring performed by the spectroradiometer, sun photometer, etc. are considered as additional data. It is advisable to use the data of the AERONET radiometer network. Additionally, the availability of information about the navigational reference of hyperspectral images, as well as access to images obtained using different video equipment is especially very useful when addressing targets.

The approach, offered in the article, is tested on the example of the atmospheric correction of hyperspectral images of the landfill site of Dokuchaev Soil Science Institute in the Tula region. Aviation hyperspectrometer produced by JSC "NPO "Lepton" was used during the experimental work. Ground-based measurements obtained by spectroradiometer ASD FieldSpec(R)3 and by sun photometer MICROTUPS(R)II were selected as a source of information for aggregation. It is revealed that measurements of the sun photometer are mostly useful for the atmospheric correction. Such principal atmospheric parameters as meteorological visibility range and precipitable water vapour are obtained from these measurements. It is shown that the best results were achieved in the absorption bands of water and in the blue region of the spectrum.

Keywords: hyperspectrometer, spectroradiometer, sun photometer, network AERONET, atmospheric correction, thematic hyperspectral image processing, agricultural systems.

Введение

В настоящий момент в таких известных пакетах обработки данных дистанционного зондирования, как ENVI, ERDAS Imagine, PCI Geomatica и т.п., для обработки гиперспектральных изображений, получаемых в результате авиакосмического дистанционного зондирования, практически отсутствует возможность эффективного использования дополнительной информации о снимке для совместной обработки всей совокупности доступных данных о подстилающей поверхности и состоянии атмосферы в рамках решения единой целевой задачи. Это требует от специалиста-обработчика выполнения большого количества дополнительных процедур для комплексного анализа проведённых измерений, что не всегда приемлемо даже при анализе данных среднего объёма.

В результате была поставлена и решена задача автоматизации совместного использования данных, получаемых при гиперспектральной съёмке и съёмке сопутствующими приборами, для повышения эффективности обработки. Упор при этом был сделан на проведении атмосферной коррекции как процедуры, для которой наличие дополнительных к основному массиву данных о сцене приводит к существенному повышению эффективности решения целевой задачи.

В качестве исходной информации для комплексирования были выбраны данные самолётной съёмки гиперспектрометром производства ЗАО "НПО "Лептон", данные наземного спектрометрирования спектрорадиометром ASD FieldSpec(R)3 и данные солнечного фотометра MICROTOPS(R)II. Как будет показано далее, эти данные позволяют провести атмосферную коррекцию гиперспектральных данных с высокой точностью и уточнить радиометрические характеристики прибора.

Место атмосферной коррекции в схеме обработки гиперспектральных данных

Типовые технологические цепочки тематической обработки гиперспектральных изображений при решении таких целевых задач, как поиск

заданных объектов, тематическая классификация и индексный анализ, показаны на рис. 1.

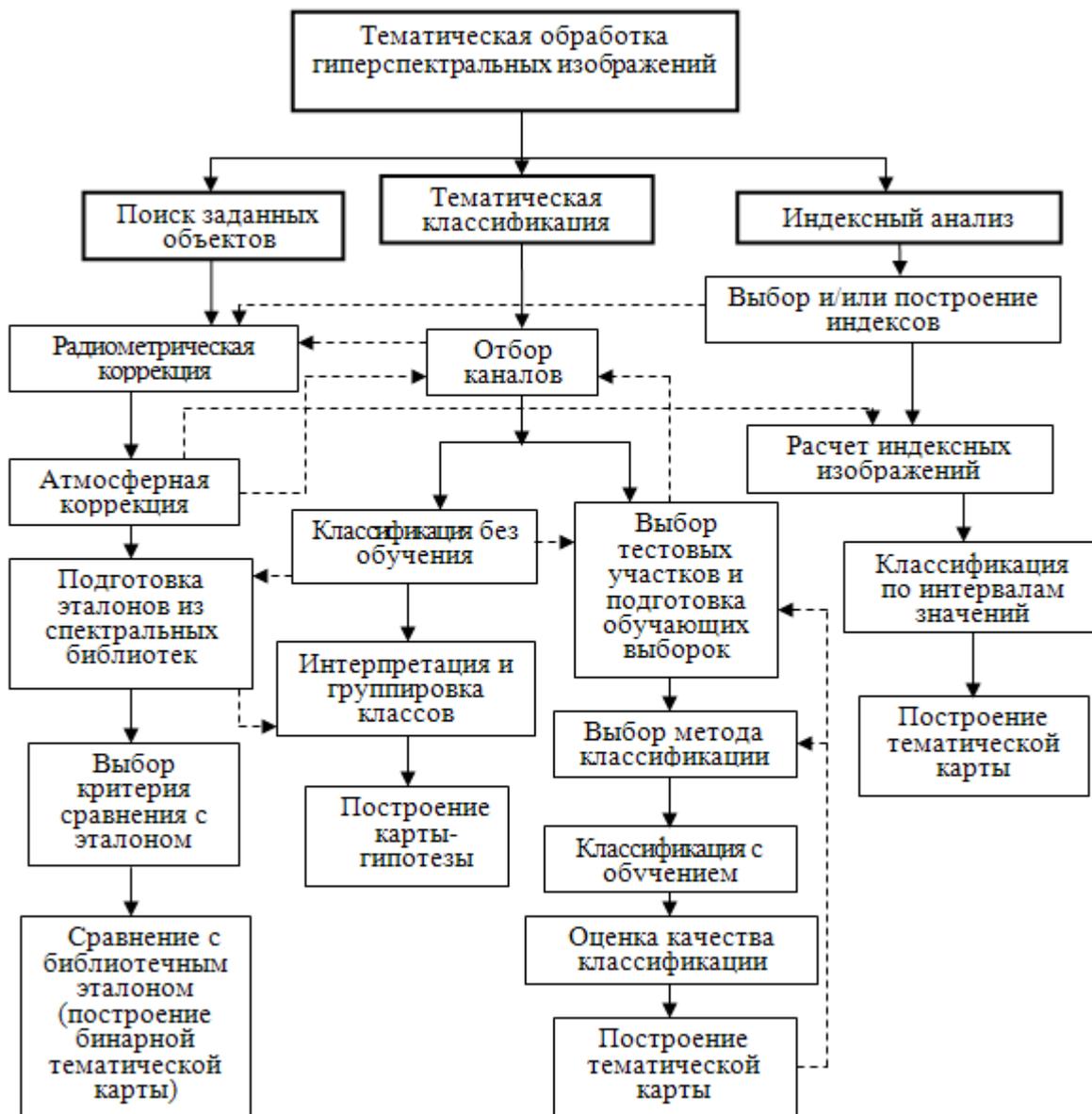


Рисунок 1 – Тематическая обработка гиперспектральных изображений

В ряде случаев (классификация в пределах одного снимка) радиометрическая и/или атмосферная коррекция иногда не требуются, а дополнительные данные используются только в случае проведения процедуры интерпретации получаемых результатов или при ручном задании областей интереса для контролируемой классификации [1]. Однако в большинстве технологических цепочек при решении целевой задачи необходима унификация

данных для возможности проведения мультивременного анализа и для уточнения значений спектральных индексов [2-4]. В общем случае, при отсутствии подробных данных о подстилающей поверхности атмосферная коррекция является необходимым этапом для последующего корректного применения большинства алгоритмов с априорно задаваемыми параметрами. Однако, в свою очередь, атмосферная коррекция крайне чувствительна к состоянию атмосферы во время съёмки, что вносит существенную систематическую погрешность в обработанные таким образом гиперспектральные данные. В настоящее время разработано множество алгоритмов атмосферной коррекции гиперспектральных данных, в которых различным образом компенсируется недостаток информации о состоянии атмосферы на момент съёмки [5]. В то же время одним из наилучших вариантов с точки зрения эффективности решения целевых задач является использование данных об атмосфере с сопутствующих приборов [6]. Такой подход в большинстве случаев существенно проще, нежели непосредственное получение подробных данных о подстилающей поверхности из других известных источников.

Комплексирование данных, получаемых с различных приборов, при проведении атмосферной коррекции гиперспектральных данных

В существующих пакетах обработки гиперспектральных данных (ENVI, ERDAS Imagine, PCI Geomatica) работа по заданию параметров атмосферной коррекции возлагается на пользователя. Так, при обработке данных полевых измерений предполагается, что пользователь программного комплекса самостоятельно (например, в Microsoft Excel, Gnumeric или аналогичном программном обеспечении) обработает все сопутствующие гиперспектральным снимкам данные и вручную задаст параметры атмосферной коррекции. В то же время при обработке больших массивов данных, в особенности мультивременных, это является весьма трудоёмким занятием. В связи с этим коллективом авторов в рамках программного комплекса для обработки

гиперспектральных изображений "Альбедро", разрабатываемого на базе МФТИ, была проведена работа по автоматизации комплексирования данных, получаемых с различных приборов при проведении полевых измерений. В настоящий момент поддерживается импорт данных спектрорадиометров популярной линейки ASD FieldSpec(R), солнечного фотометра MICROTOPS II, а также автоматический поиск и загрузка данных сети AERONET [7] при их наличии. С целью подтверждения эффективности разработанного подхода к атмосферной коррекции 24 июля 2014 года в течение одного дня на территории полигона Почвенного института им. В.В. Докучаева (рис. 2) были проведены полевые измерения, по результатам которых построена спектральная библиотека, показанная на рис. 3.

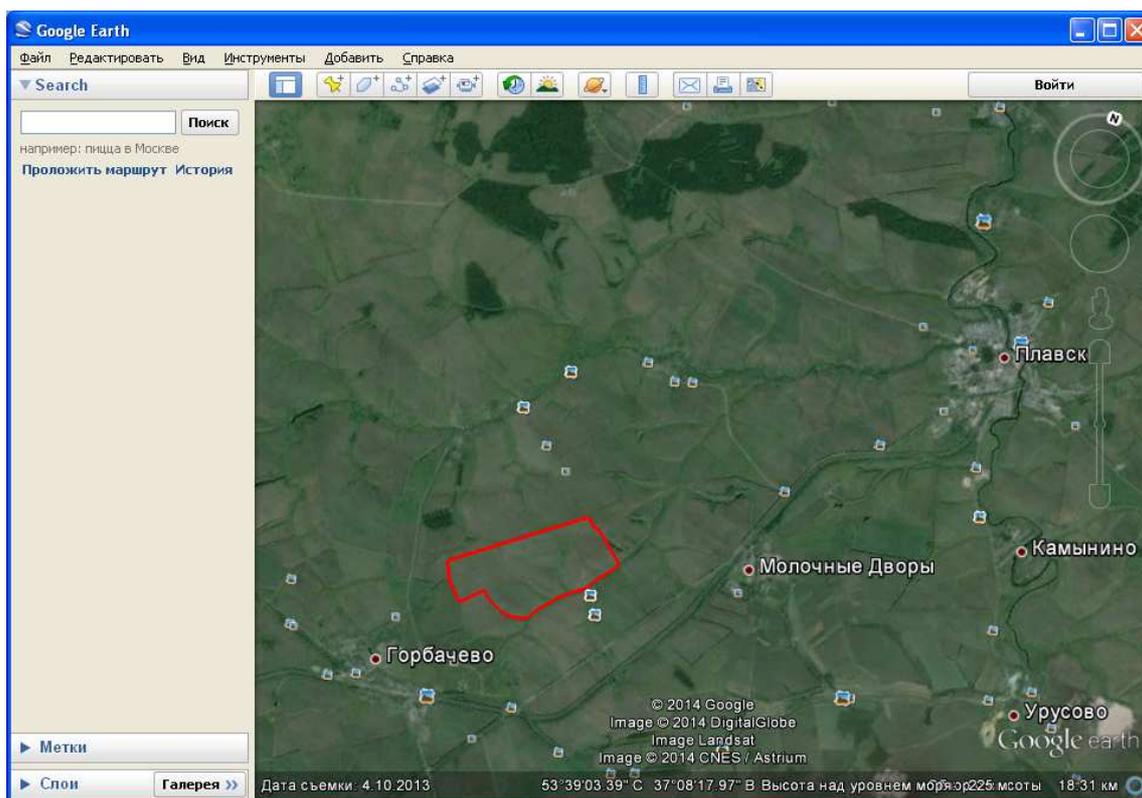


Рисунок 2 – Полигон почвенного института им. В.В. Докучаева, город Плавск, Тульская область

Спектральная библиотека составлена путём импорта .asd.txt файлов, содержащих результаты измерения спектрорадиометром ASD FieldSpec(R)3

спектров отражения эталонных белого и серого тел (производство SphereOptics GmbH), а также подстилающей поверхности. В "Альбеда" спектры автоматически группируются и усредняются, проводится определение типа измеряемого объекта (белое или серое тело, подстилающая поверхность), типа отражённого излучения (прямое и диффузное или только диффузное). Также при наличии фотографий автоматически происходит их загрузка в библиотеку с учетом даты и времени съёмки.

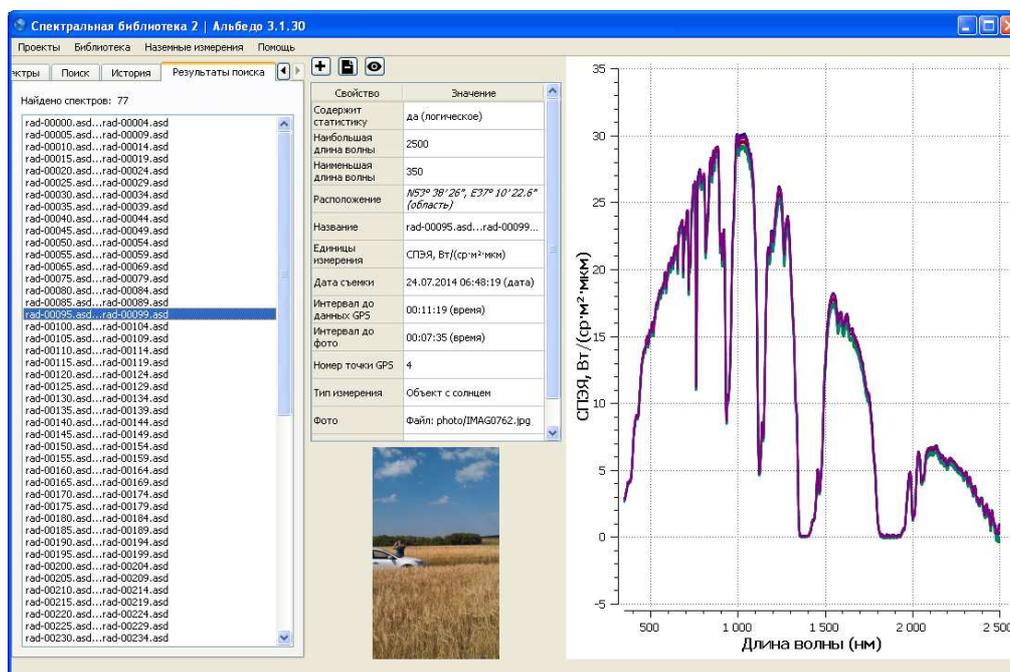


Рисунок 3 – Спектральная библиотека с результатами измерений в программе "Альбеда" (разработка МФТИ)

Кроме того, аналогичным образом спектрам присваивается широта и долгота точки измерения при наличии gps-данных. Возможен экспорт спектров из библиотеки в основной выполняемый проект по решению целевой задачи с сохранением всей метаданных и автоматическим размещением точки на геопривязанном снимке по gps-координатам. Эти данные впоследствии можно использовать как спектральные эталоны для классификации или валидации результатов проведения различных процедур обработки.

Однако для проведения атмосферной коррекции наиболее полезны

данные солнечного фотометра, из которых выделяются такие ключевые параметры атмосферы, как метеорологическая дальность видимости и влагосодержание. Влагосодержание атмосферы выводится непосредственно из данных солнечного фотометра по формуле

$$u = \left(\frac{\tau_{a2} m (1 - 1.16) - \ln \left(\frac{V_1 V_{02}}{V_2 V_{01}} \right)}{k m^b} \right)^{1/b},$$

где u – влагосодержание атмосферы (PWC – precipitable water vapour, см или г/см²);

m – воздушная масса (толщина воздушного столба на пути прямого солнечного света);

τ – коэффициент рассеяния атмосферы при данной длине волны (ок. 940 нм);

V – плотность энергии излучения, индекс «0» соответствует верхней границе атмосферы, его отсутствие – излучению, достигающему земной поверхности, «1» и «2» обозначают каналы фотометра («1» находится в полосе поглощения воды – 940 нм, «2» - в т.н. «окне прозрачности» - 870 или 1020 нм);

k , m , b – константы прибора, подбираемые численно при калибровке.

Метеорологическая дальность видимости оценивалась путём линейной интерполяции полученных значений прозрачности атмосферы к длине волны 550 нм, после чего рассчитывалась по формуле

$$VIS = \frac{-\ln(0.02)}{\sigma_{ext}} \approx \frac{3.912}{\sigma_{ext}} \text{ (формула Кошмидера),}$$

где σ_{ext} – коэффициент поглощения атмосферы при длине волны 550 нм.

Было выявлено, что в течение суток метеорологическая дальность видимости варьировалась сильнее, нежели влагосодержание (рис. 4 и 5).

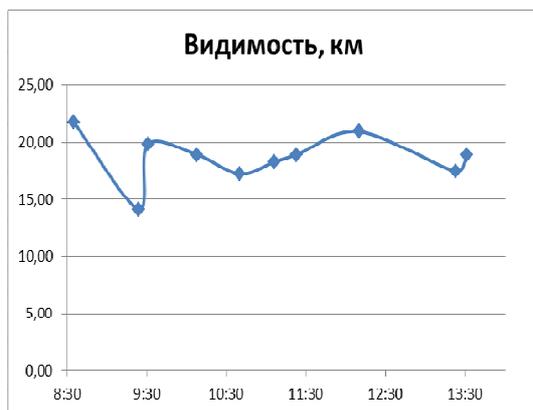


Рисунок 4 – Изменение метеорологической дальности видимости в зависимости от времени суток в ходе проведения измерений. Время местное

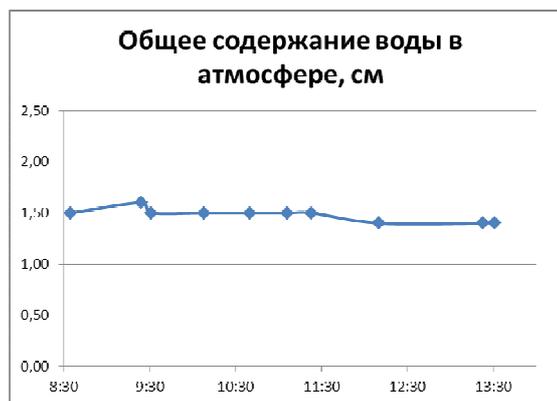


Рисунок 5 – Изменение общего содержания воды в атмосфере в зависимости от времени суток в ходе проведения измерений. Время местное

Влагосодержание и метеорологическая дальность видимости – два параметра, сильнее всего влияющие на результаты атмосферной коррекции. Для оценки этого влияния при помощи пакета MODTRAN(R)5 были проведены расчёты спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) у поверхности Земли с параметрами атмосферы, полученными в результате моделирования, и с измеренными параметрами. Впоследствии расчетные СПЭЯ сравнивались со СПЭЯ белого тела, измерявшейся в полевых условиях в ходе работ. Результаты сравнения приведены на рис. 6 (СПЭЯ в каждом случае) и рис. 7 (отношение спектров, смоделированных с использованием MODTRAN(R)5, к данным наземных измерений). Из представленных результатов ясно видны преимущества комплексной обработки данных с различных приборов. Особенно заметны улучшения в полосах поглощения воды и в синей области спектра.

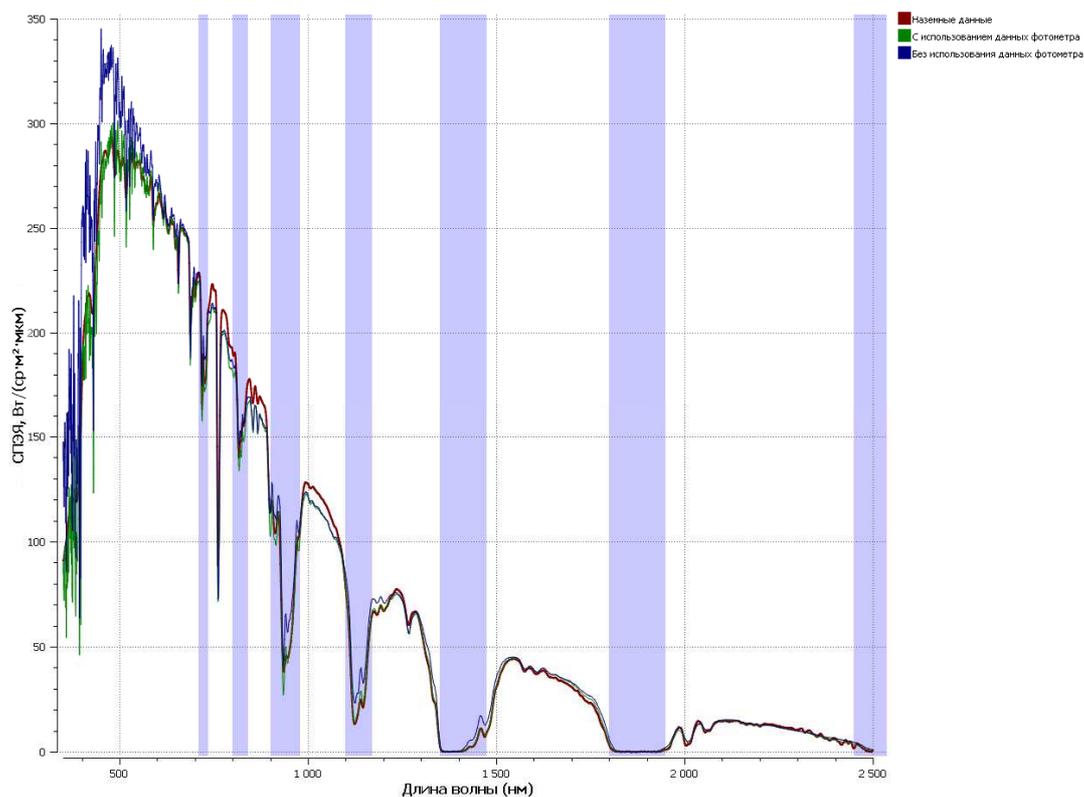


Рисунок 6 – Сравнение данных наземных измерений с результатами моделирования MODTRAN(R)5

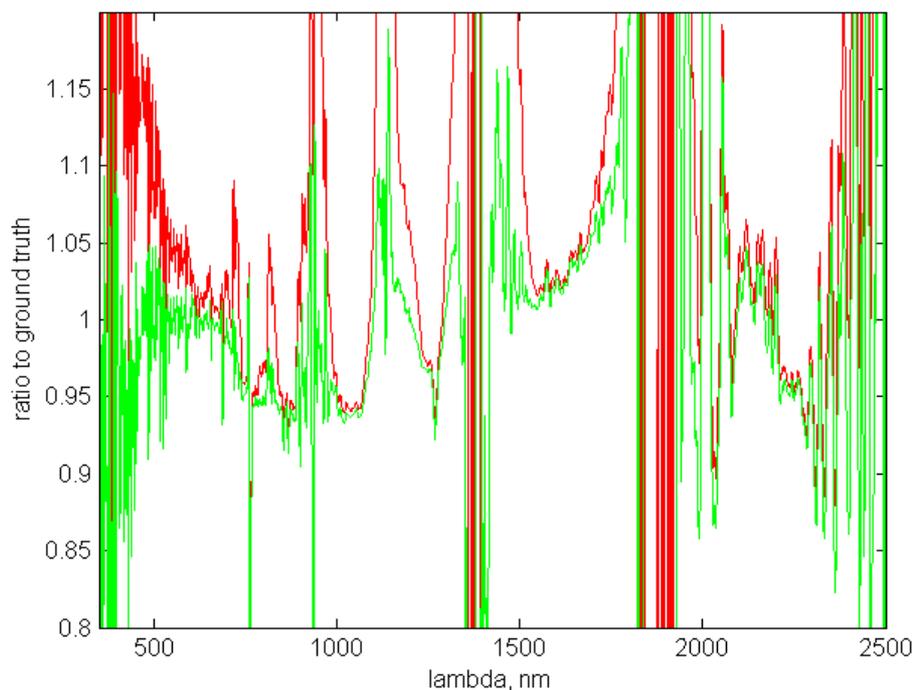


Рисунок 7 – Отношение смоделированных с использованием MODTRAN(R)5 данных к данным наземных измерений. Красная линия – моделирование без учёта измерений фотометром, зелёная – моделирование с учётом данных фотометра.

Заключение

Таким образом, в статье приведены результаты работы по автоматизации совместной обработки данных, получаемых с авиационного гиперспектрометра и сопутствующих приборов. В числе прочего реализована возможность загрузки данных сети AERONET для определения метеорологической дальности видимости и содержания воды в атмосфере в автоматическом режиме. С использованием модели переноса излучения в атмосфере MODTRAN(R)5 проведены расчеты, показывающие сравнение данных наземных измерений с результатами моделирования. Проведённые эксперименты показали эффективность использования этих данных при проведении атмосферной коррекции гиперспектральных изображений, полученных при съёмке агросистем на территории полигона Почвенного института им. В.В. Докучаева. Наилучшие результаты достигнуты в полосах поглощения воды и в синей области спектра.

Благодарности

Работа выполнена в рамках соглашения № 14.575.21.0028 от «30» июня 2014 г. между Московским физико-техническим институтом и Министерством образования и науки РФ (Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57514X0028). Автор выражает благодарность сотрудникам Почвенного института им. В.В. Докучаева за помощь в организации измерений на испытательном полигоне.

Литература

1. Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney, M. P., & Macomber, S. A. (2001). Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment*, 75(2), 230–244.
2. Datt, Bisun, et al. "Preprocessing EO-1 Hyperion hyperspectral data to support the application of agricultural indexes." *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 41.6 (2003): 1246-1259.

3. Bach, Heike, and Wolfram Mauser. "Atmospheric correction of hyperspectral data in terms of the determination of plant parameters." *Satellite Remote Sensing*. International Society for Optics and Photonics, 1994.

4. le Maire, Gueric, et al. "Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass." *Remote Sensing of Environment* 112.10 (2008): 3846-3864.

5. Gao, Bo-Cai, et al. "Atmospheric correction algorithms for hyperspectral remote sensing data of land and ocean." *Remote Sensing of Environment* 113 (2009): S17-S24.

6. Rochford, Peter A., et al. "Validation and refinement of hyperspectral/multispectral atmospheric compensation using shadowband radiometers." *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 43.12 (2005): 2898-2907.

7. Holben, B. N., et al. "AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization." *Remote sensing of environment* 66.1 (1998): 1-16.