

КАЛИБРОВКА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ АВИАЦИОННОЙ СЪЕМКИ ПО СОПУТСТВУЮЩИМ НАЗЕМНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ЭТАЛОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАБЛЮДАЕМЫХ СЦЕН

© 2013 г. В. Н. Остриков, О. В. Плахотников*

Санкт-Петербургский филиал ОАО “Концерн “Вега”

*E-mail: oleg-vl@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.04.2013 г.

На значительном экспериментальном материале рассмотрены возможности реализации калибрующего пересчета исходных данных гиперспектральной авиационной съемки в коэффициенты спектральной яркости. Оцениваются ошибки внешней калибровки для разных условий наблюдений и различной аппаратуры получения данных.

Ключевые слова: внешняя калибровка, гиперспектральная съемка

DOI: 10.7868/S0205961413060067

ВВЕДЕНИЕ

Успешность тематической обработки данных гиперспектральной съемки (ГСС) в значительной степени зависит от качества реализации внешней калибровки, результатом которой является пересчет получаемых “кубов” в распределения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ). Для этого преобразования в большинстве случаев используются методы атмосферной коррекции с определением обратной передаточной функции трассы “разрешаемый элемент поверхности-регистрирующий прибор”. Такие методы пересчета требуют в свою очередь периодического контроля реализуемой точности на основе специальных эталонов с проведением сопутствующих (синхронно или квазисинхронно с дистанционной съемкой) наземных измерений. Кроме того, для получения широкого набора характеристик различных поверхностей и объектов наблюдения, создания баз спектральных характеристик для решения задачи идентификации такие совместные измерения используются для непосредственного пересчета получаемых данных в КСЯ.

Реализация пересчета данных — обычно это отсчеты прибора в единицах спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) — даже с привлечением внешних эталонных поверхностей, контролируемых в синхронном или разнесенном по времени режиме наземных измерений, процедура не вполне однозначная. Главной причиной этого является влияние приземного (для авиационных данных) слоя атмосферы или всего

атмосферного столба (для данных космической съемки).

ПРОВЕДЕНИЕ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

С целью получения экспериментальных данных и отработки методов внешней калибровки в Санкт-Петербургском филиале ОАО “Концерн “Вега” совместно с другими организациями для трех сезонов (весна, лето, осень) в течение 2011–2012 гг. было проведено несколько экспедиций на Северо-Западе по урбанизированной местности и угодьям с.-х. назначения (опытные поля Агрофизического научно-исследовательского института (ГНУ АФИ) Россельхозакадемии). В результате был получен большой набор данных ГСС (спектральных “кубов”) диапазона 0.4–1.0 мкм различной авиационной аппаратурой (трех типов, отличающихся пространственным разрешением 0.3–2 м), в различных условиях съемки (включая сплошную облачность), для различных высот (от 500 м до 3.6 км). Каждая экспедиция включала в себя проведение сопутствующих (или отсроченных) наземных измерений тестовых поверхностей искусственного (по специально расстилаемым эталонам) или естественного типа (асфальт, участки травяного покрова, злаковые культуры). Для наземных измерений использовался полевой спектрометр Field Spec (спектральное разрешение 3.5 нм, диапазон от 0.325 до 1.075 мкм) с набором аттестованных эталонных мир и различ-

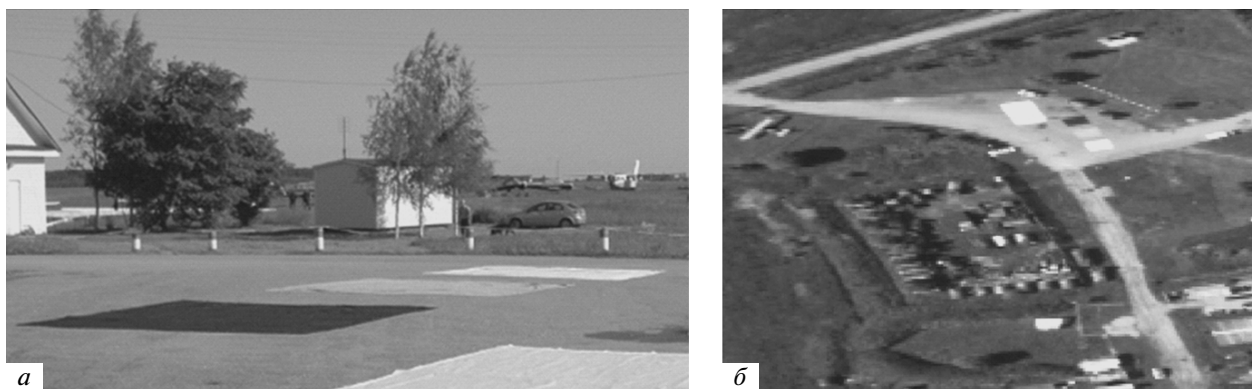


Рис. 1. *a* – Расположение тестовых мир на асфальте; *б* – фрагмент авиационной гиперспектральной съемки (синтезированный цветной кадр).

ными оптическими насадками. В ходе получения наземных данных регистрировались как собственно спектральные ходы СПЭЯ по измеряемым элементам сцен, так и их пересчитанные значения КСЯ значения. Полетные задания пилотам носителей аппаратуры формировались таким образом, что тестовые поверхности попадали в поле зрения аппаратуры почти при каждом вылете, что позволяло в большинстве случаев получать практически синхронно измеренные данные по тестовым поверхностям авиационным и наземным путем.

Внешняя калибровка спектральных кубов была реализована в соответствии с выражением

$$\tilde{\rho}_{ij} = \rho_K(L_{ij} - L_0)/(L_K - L_0), \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, I; \quad j = 1, \dots, J,$$

где $\tilde{\rho}_{ij}$ – вычисляемая оценка КСЯ текущего ij пиксела снимка; L_{ij} – СПЭЯ текущего ij пиксела снимка; L_K – СПЭЯ калибрующего эталона, полученное по снимку; L_0 – СПЭЯ смещения; ρ_K – КСЯ калибрующего эталона, измеренное ручным спектро радиометром; I, J – размеры спектральных образов “куба” в пикселах.

Для расчетов на основе выражения (1) неопределенным является величина СПЭЯ смещения L_0 , обусловленная влиянием атмосферного слоя, или, более точно, многократным рассеянием в этом слое. Определение этой величины представляется наиболее сложным вопросом решения задачи внешней калибровки данных, в большинстве случаев оно реализуется через поиск на участке наблюдаемой сцены пиксела, для которого априорно известно, что его КСЯ с достаточной степенью вероятности можно считать равным нулю (Шовенгердт, 2010). Однако как показала

практика, найти такой элемент на сцене оказывается практически невозможно. В силу этого обстоятельства возникла необходимость применить более подходящий метод оценки СПЭЯ смещения. В частности, для большинства случаев хорошей оказалась для оценки L_0 минимальная величина сигнала на каждой линии спектра, найденная по всем элементам зарегистрированного куба

$$L_0(\lambda) = \min \{L_{ij}(\lambda)\}. \quad (2)$$

Однако и такой подход не всегда был удачным, поэтому в отдельных случаях для расчета смещения принималось и другое значение, которое определялось как часть среднего спектрального сигнала на сцене

$$L_0(\lambda) = K_L \bar{L}_{ij}(\lambda). \quad (3)$$

Здесь значение коэффициента K_L , обычно лежащее в диапазоне от 0.1 до 0.25, выбиралось таким образом, чтобы вычисляемое значение КСЯ по дополнительным тестовым поверхностям (не участвующим в собственно калибровке) принимало наиболее близкое значение к измеренной характеристике наземным прибором (после приведения спектров авиационного и наземного приборов).

В соответствии с рис. 1, в ходе полетной экспедиции над территорией аэродрома “Никольское” (Гатчинский р-он Ленинградской обл.), на плоской асфальтовой площадке были расстелены четыре тестовые мира: эталонная мира (большая белая) и три дополнительные – “темная”, “серая” и “светлая”. Все тестовые поверхности измерялись ручным спектро радиометром перед авиационной съемкой и в ходе полета. Поскольку угол зрения наземного прибора не соответствует разрешению авиационного прибора, эталонные поверхности промерялись в 10–15 точках по полю тестовых поверхностей с разрешением около 0.3 м.

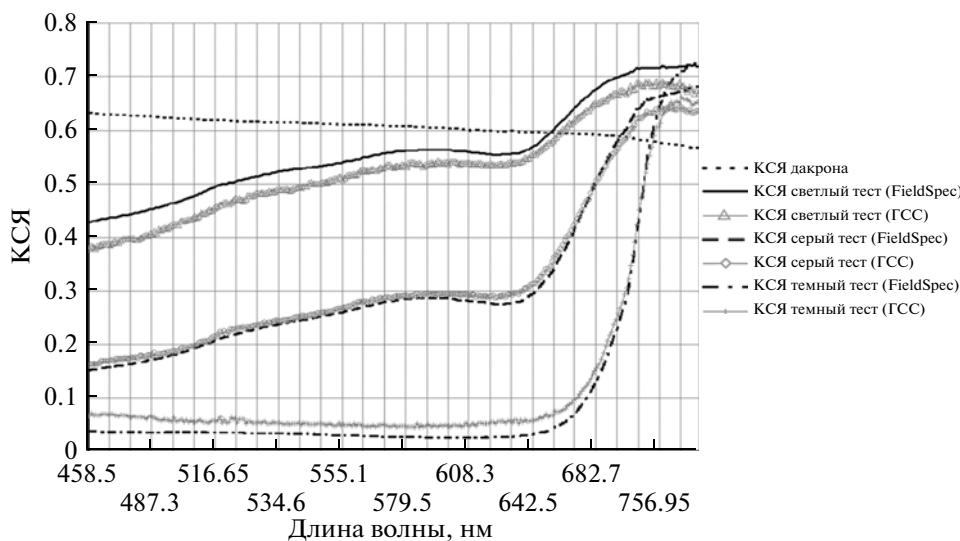


Рис. 2. КСЯ тестовых эталонов, измеренных наземным спектрометром FieldSpec, и пересчитанных в ходе калибровки данных ГСС.

Собственно калибровка полученного кадра проводилась по большому белому эталону в соответствии с выражением (1), а контроль правильности выбора смещения — по дополнительным тестовым мирам. На рис. 2 приведены КСЯ тестовых эталонов, измеренных наземным спектрометром Field Spec, и пересчитанных в ходе калибровки данных ГСС. Здесь же приведен спектральный ход калибрующего белого эталона (КСЯ дакрона), который, естественно, полностью совпадает с измеренным наземным прибором.

Приведенные данные показывают, что в указанном случае использование в качестве смещения $L_0(\lambda)$ величины, определяемой выражением (2), позволяет особенно точно воспроизвести серый тестовый эталон, в то же время КСЯ светлого и темного воспроизводятся с некоторыми ошибками. Минимальные ошибки (в пределах границ 6% от номинала) соответствуют серому тестовому образцу. Максимальные ошибки — темному образцу (относительная среднеквадратическая ошибка — около 20%). Этот факт подтверждает известные (Шовенгердт, 2010) трудности калибровки по темным эталонам и требует применения эталона, по возможности, с равномерной характеристикой КСЯ значительной величины, как это имеет место в данном случае (рис. 2 — “КСЯ дакрона”). Следует отметить особо, что в силу практической необходимости в ходе получения данных носитель аппаратуры летал с углом атаки около 10 град, что потребовало в свою очередь учета этого обстоятельства в ходе корректировки данных наземных измерений в пересчете на условия воздушной съемки. Как показали исследования этого вопроса, наличие индикатрис у дополнительных этало-

нов вносит существенные ошибки (до 15–25% в зависимости от высоты Солнца), что приводит в свою очередь к необходимости проведения специальных измерений и получения модельных аппроксимаций этих индикатрис.

По данным, описанным выше и полученным по одной сцене, калибровались результаты съемки, полученные по другой сцене в тот же день. В качестве примера на рис. 3 приведены снимки участка овсяного поля, по которому были получены данные авиационной гиперспектральной съемки. А на рис. 4 приведены спектральные ходы результатов калибровки данных ГСС (рис. 3б) и наземных измерений полевым спектрометром FieldSpec.

Спектральные ходы калибровки, в сравнении с данными наземных измерений по этому участку, показывают очень хорошее качество калибрующего пересчета данных. Здесь результаты съемки по овсу весьма точно совпадают с наземными измерениями.

Аналогичные приведенным результатам данные по калибровке снимков, полученных при сплошной облачности с высоты 500 м (с вертолетного носителя). Здесь калибровка проводилась с учетом расчета смещения на основе выражения (3). Сравнение с наземными измерениями показало очень хорошее качество калибровки — со среднеквадратической ошибкой около 8% по совокупности нескольких тестовых образцов искусственных поверхностей (асфальта, окрашенного белой краской асфальта — разметки взлетно-посадочной полосы (ВПП), трех участков травы).

Как отмечалось выше, в ходе получения данных гиперспектральной воздушной съемки исследовались возможности калибровки по искус-

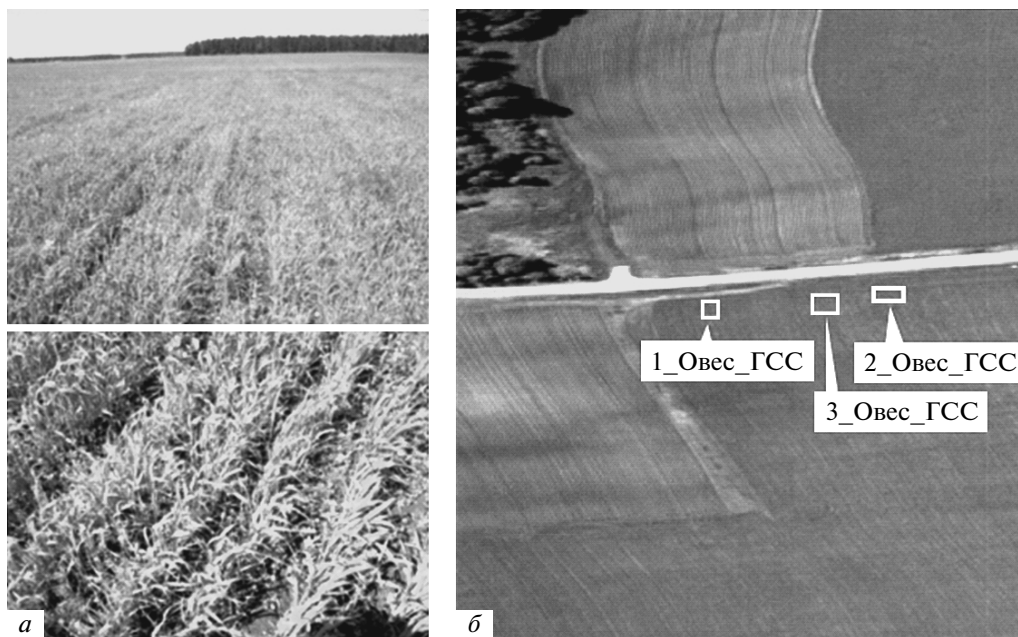


Рис. 3. *a* – Фотографии участка овсяного поля; *б* – данные авиационной ГСС данного поля.

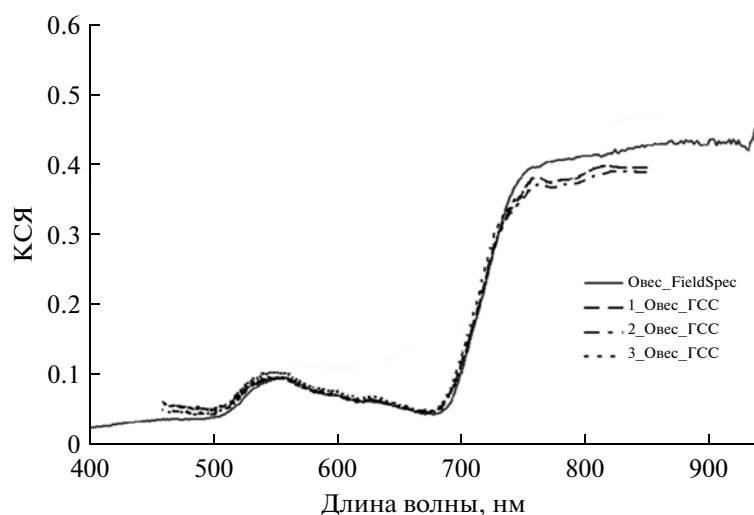


Рис. 4. Спектральные ходы результатов калибровки данных ГСС, приведенных на рис. 3б, и наземных измерений полевым спектрометром FieldSpec.

ственным поверхностям, часто присутствующим на реальных сюжетах. В качестве примера можно привести результаты калибровки данных ГСС по асфальту дороги. Здесь наземные измерения асфальта и растительности (травы) проводились на семь дней ранее собственно авиационной съемки, которая в данном случае осуществлялась с высоты полета 3600 м аппаратурой отличного по пространственному разрешению от вышерассмотренного типа. На рис. 5 приведены спектральные ходы участка злаковой культуры, измеренного назем-

ным прибором и того же участка, полученного по данным авиационной съемки в ходе калибровки.

Некоторые несовпадения, возможно, объясняются недельным интервалом между наземной и авиационной съемкой, а также ошибками калибровки по асфальту с малыми значениями КСЯ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические исследования на основе реальных данных гиперспектральной съемки по реализации внешней калибровки, получен-

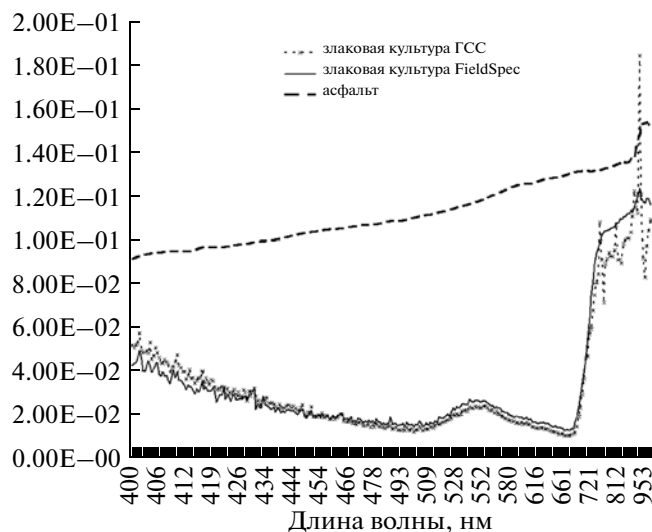


Рис. 5. Спектральные ходы участка злаковой культуры, полученного в результате калибровки гиперспектральных данных авиационной съемки по асфальту дороги, и его аналога по наземным измерениям (FieldSpec).

ные различными приборами в разных условиях наблюдения, позволяют сделать выводы о том, что использованные в работе методики синхронных измерений и методы пересчета спектральных кубов данных в значения КСЯ близки к точностям калибровки данных в пределах 10–15% по среднеквадратическому отклонению в рассматриваемом спектральном диапазоне. Полученные результаты в основном соответствуют современному научному уровню знаний, описывающему

процессы внешней калибровки спектральной аппаратуры ДЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 556 с.
- Sanders L.C., Raqueño R.V., Schott J.R.* Atmospheric correction algorithm for hyperspectral imagery. DOE/NV/11718-367. Oxford Univ. Press, 1997. 8 p.

Calibration of Hyperspectral Data Aircraft Shooting on Related Ground Measurements of Standard Surfaces Observed Scenes

V. N. Ostrikov, O. V. Plakhotnikov

Joint-Stock Company "Radio Engineering Corporation "Vega", St. Petersburg Branch

At a considerable experimental data considered the possibility of implementing the initial data conversion hyperspectral aircraft shooting in the reflectance. Considers different algorithms in relation to the presence and absence of co-synchronous measurements. External calibration errors are estimated for various conditions of observation and various equipment receiving data.

Keywords: external calibration, hyperspectral images