Исследование данных комплекса широкозахватной мультиспектральной аппаратуры КА «Ресурс-П» для решения спектрометрических задач

А.И. Васильев, А.С. Стремов, В.П. Коваленко

Научный центр оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы», Москва, 127490, Россия *Е-mail: nova@ntsomz.ru*

В статье приведены результаты исследования пригодности, при решении спектрометрических задач, оптико-электронного комплекса широкозахватной мультиспектральной аппаратуры (КШМСА), установленной на КА «Ресурс-П». Для этого разработана методика оценки параметров абсолютной калибровки широкозахватной мультиспектральной аппаратуры среднего разрешения (ШМСА-СР) КА «Ресурс-П» сопоставлением с данными аппаратуры Operational Land Imager (OLI), установленной на КА Landsat 8. Оценка соответствия спектральных каналов сенсоров проведена с применением ПК МОDTRAN: смоделирована съемка тест-объектов в одинаковых условиях и рассчитаны значения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) на верхней границе атмосферы (ВГА) обоих сенсоров. Выполнена съемка нескольких тестовых полигонов в период с мая по август 2016 г. По результатам космической съемки проанализирована динамика изменения параметров абсолютной калибровки (по параметру чувствительности — СКО не более 7% средней величины чувствительности спектрального канала, по параметру темного тока — СКО в пределах 5,6 Вт/(м² ср мкм)) и возможность применения данных КШМСА при решении спектрометрических задач (с точностью не хуже 0,068 на примере NDVI).

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, спектрорадиометр, комплекс широкозахватной мультиспектральной аппаратуры, космический аппарат «Ресурс-П», параметры абсолютной калибровки, кросс-калибровка, динамика изменения параметров абсолютной калибровки

Одобрена к печати: 17.05.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-36-51

Введение

В соответствии с Федеральной космической программой России на 2006–2015 гг. осуществлено создание геоинформационного сервиса — «Банк базовых продуктов» (Васильев и др., 2015; Марков и др., 2016). Этот сервис предназначен для потокового создания и распространения информационных продуктов, формируемых по данным в первую очередь российских космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Программные технологии потокового автоматического формирования информационных продуктов весьма требовательны к геометрической и радиометрической точности исходных данных, точности географической привязки, а также полноте информации о качестве данных (в том числе требуется маскирование облачности на снимках). В свою очередь, с целью обеспечения потребителей достоверной информацией разработчиками сервиса предлагаются подходы к верификации распространяемых данных сопоставлением с продуктами, сформированными по данным зарубежных КА ДЗЗ (Васильев, Стремов, Морозов, 2015).

В настоящее время разработан ряд программно-алгоритмических решений для геометрической калибровки оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) и уточнения географической привязки данных отечественных КА ДЗЗ (Антонушкина и др., 2015; Васильев, 2015; Катаманов, 2014; Кузнецов и др., 2014; Лобзенёв, Логванёв, 2014). Исследователями проводятся работы по созданию методов маскирования облачности на данных российских КА ДЗЗ, например, (Кузнецов, Пошехонов, 2009; Королев и др., 2014; Васильев, 2016). Вместе с тем наиболее востребованные исследования (для формирования информационных продуктов) в части оценки радиометрической точности и динамики изменения параметров абсолютной калибровки ОЭА природно-ресурсного назначения подробно проведены для данных КМСС КА «Метеор-М» (Василейский и др., 2009; Жуков и др., 2014; Кондратьева и др. 2015). Отдельные эксперименты выполнены для данных МСС КА «Канопус-В» и БКА (Куревлева и др., 2015; Силюк, Катковский, 2016), а также гиперспектральной аппаратуры КА «Ресурс-П» (Гришанцева и др., 2014).

Ввиду увеличения группировки космического комплекса «Ресурс-П», оборудованного КШМСА — комплексом широкозахватной мультиспектральной аппаратуры (Бакланов и др., 2016), в рамках данной работы ставилась следующая задача: оценка пригодности данных КШМСА для проведения спектрорадиометрических измерений как одной из наиболее перспективных для формирования базовых продуктов (БП). Для этого была разработана методика кросс-калибровки данных КШМСА по данным OLI KA Landsat 8, выполнена съемка тестовых полигонов в период май–июль 2016 г., проведены эксперименты по оценке параметров абсолютной калибровки и проанализирована динамика их изменения.

Сравнение характеристик съемочной аппаратуры КШМСА КА «Ресурс-П» и OLI KA Landsat 8

Для уточнения параметров абсолютной радиометрической калибровки данных ОЭА КА ДЗЗ исследователями активно применяются подходы на основе съемки природных тестовых полигонов (Кондратьева и др., 2015) и кросс-калибровки (Жуков и др., 2014; Силюк, Катковский, 2016) по данным зарубежных КА ДЗЗ. С учетом следующей специфики КШМСА:

1) два идентичных по спектральным характеристикам сенсора разной полосы захвата и пространственного разрешения;

2) отсутствие штатной технологии оценки и уточнения параметров абсолютной калибровки аппаратуры в ходе ее эксплуатации (Блинов, 2012; Бакланов и др., 2016) для оценки параметров абсолютной радиометрической калибровки в этой работе был выбран подход на основе кросс-калибровки по данным сенсора OLI KA Landsat 8 в силу соответствия его спектральных и пространственных характеристик характеристикам ШМСА-ВР (*табл. 1*) как потенциально наиболее востребованной в интересах решения региональных задач аппаратуры природно-ресурсного назначения.

Соответствие функций спектральной чувствительности (ФСЧ) спектральных каналов Blue, Green, Red, NIR аппаратуры OLI и ШМСА представлено на *рис.* 1. Эти данные были использованы в программном комплексе MODTRAN 5.2.0.0 с целью сравнения спектральных характеристик аппаратур ШМСА и OLI. Для этого была смоделирована съемка десяти тест-объектов в одинаковых условиях и рассчитаны значения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) на верхней границе атмосферы (ВГА) обоих сенсоров. В зависимости от типа тест-объектов выбиралась следующие модели атмосферы из ПК MODTRAN: лето, средние широты; зима, средние широты; лето, субарктические широты; зима, субарктические широты; тропическая; модель 1976 US Standard. В зависимости от тест-объекта подбирались с применением моделей: лето, средние широты; тропическая; модель 1976 US Standard.



Рис. 1. ФСЧ спектральных каналов Blue, Green, Red, NIR аппаратуры OLI (пунктирные цветные линии) и ФСЧ соответствующих им каналов ШМСА (сплошные цветные линии). Серым цветом показана функция прозрачности атмосферы

Annapamypa	Полоса захвата, км	Пространственное разрешение, м	Спектральные диапазоны рассматриваемых каналов, нм
ШМСА-СР	480	120	Blue (430510) Green (510580)
ШМСА-ВР	96	24	NIR1 (700900) NIR2 (800900)
OLI	185	30	Blue (452512) Green (533590) Red (636673) NIR (851879)

Таблица 1. Основные характеристики КШМСА и OLI

Тест-объекты	IIIMCABlue / OLIBlue	IIIMCAGreen / OLIGreen	IIIMCARed / OLIRed	IIIMCANIR1 / OLINIR1	IIIMCANIR2 / OLINIR2
«Антарктический снег»	0,94	0,95	0,93	1,26	0,99
«Лиственные деревья»	0,93	0,89	1,24	1,03	0,98
«Хвойные деревья»	0,94	0,88	1,25	1,03	0,97
«Гранит»	0,91	0,95	0,93	1,16	0,99
«Трава»	0,88	0,93	1,30	0,98	0,98
«Вода океана»	0,83	0,91	0,90	1,34	1,03
«Супесь»	1,00	1,02	0,97	1,10	0,98
«Лёд»	0,93	0,94	0,87	1,56	1,01
«Город»	0,87	1,13	0,95	1,09	0,99
«Аравия 4 (песок)»	1,01	1,05	0,97	1,07	0,98
Средние значения	0,93	0,97	1,03	1,16	0,99
СКО	0,05	0,08	0,16	0,18	0,02

Таблица 2. Результаты моделирования съёмки тест-объектов в ПК MODTRAN

По результатам численного моделирования для кросс-калибровки каналов ШМСА Blue (0,43...0,51 мкм), Green (0,51...0,58 мкм), Red (0,60...0,70 мкм), NIR2 (0,80...0,90 мкм) были выбраны соответствующие каналы аппаратуры OLI. С целью уменьшения СКО кросс-калибровку ШМСА необходимо проводить на тех же типах поверхностей, для которых планируется проведение спектрорадиометрических измерений. Так, СКО отношений СПЭЯ спектральных каналов ШМСА/OLI не превышает 0,03 при рассмотрении только поверхностей следующих тест-объектов: а) «лиственные деревья», «хвойные деревья» и «трава»; б) «Аравия 4 (песок)», «супесь» и т.д.

Кроме того, выполнена оценка возможности замены точного учета высоты Солнца и зенитного угла спутника в моделях атмосферы при расчете СПЭЯ и эффективной спектральной яркости, учитывающей ФСЧ канала, тригонометрическими функциями с целью упрощения пересчета данных OLI к данным ШМСА-СР.

Вид замены:

$$L_{\lambda}(\Theta, z) \cong L_{\lambda}(0, 0) \cdot \cos(\Theta) \cdot \cos(z), \tag{1}$$

где Θ — зенитный угол солнца; *z* — зенитный угол КА.

На графиках (*puc. 2*) представлены относительные погрешности такой замены при изменении зенитного угла Солнца Θ от 15 до 60°, а спутника *z* — для 15° (левый график) и 30° (правый график).

Как видно на рисунке, при углах визирования КА в диапазоне 0...15° погрешность из-за применения тригонометрических формул вместо строгого учета углов в модели атмосферы не превышает 1,5%. Более того, для углов визирования КА в диапазоне 0...7° допустимо упрощение (1) в следующем виде: $L_{\lambda}(\Theta, z) \cong L_{\lambda}(0,0) \cdot \cos(\Theta)$, т.е. учет только угла Солнца приводит к погрешности не более 2%.

Оценка спектрометрических возможностей КШМСА в данной работе была рассмотрена на примере ШМСА-СР, поскольку ширина ее полосы захвата позволяет упростить отбор сцен OLI, используемых для кросс-калибровки в соответствии проанализированными ограничениями.



Рис. 2 Относительные погрешности приближения (1.1); ДКВ15 — относительная погрешность коэффициента пересчета от OLI к ШМСА-СР для голубого (В) канала при угле визирования 15°, ДКG15 — для зеленого и т.д.

Методика кросс-калибровки данных ШМСА-СР КА «Ресурс-П» по данным OLI KA Landsat 8

В основу методики сопоставления данных ШМСА-СР и OLI был положен подход к кросс-калибровке данных ETM+ KA Landsat 7 и TM KA Landsat 5 (Landsat 7..., 2016) и адаптирован к специфике данных ШМСА-СР.

Методика сопоставления данных ШМСА-СР и данных OLI включает в себя следующие этапы:

1. Поиск маршрутов съемки одной территории двумя сенсорами (ШМСА-СР и OLI) по следующим критериям:

 расхождение по дате съемки не более трех дней (при высокой скорости фотосинтеза (время светлой весенней фазы), допустимо расхождение по дате съемки не более одного дня);

– расхождение по высоте Солнца не более 10°.

2. Пространственное совмещение данных набором опорных точек (уточнение геопривязки с точностью не хуже 0,5 пикселя).

3. Набор соответствующих пикселей данных ШМСА-СР и OLI.

Выбор пикселей осуществлялся на основе указания соответствующих линий. Пример выбора линий представлен на *рис. 3*.



Рис. 3. Набор пикселей на основе соответствующих линий: левый рисунок — данные OLI; центральный рисунок — обзорный вид маршрута ШМСА-СР с указанными линиями; правый рисунок — данные ШМСА-СР

Кроме того, для повышения уровня соответствия сопоставляемых СПЭЯ выполнялась предварительная обработка данных, необходимая для выполнения следующих условий:

- пространственное разрешение данных должно быть одинаковым (в ходе экспериментов разрешение OLI было приведено к 120 м);
- облачность и дымка должны быть маскированы;
- набор пикселей должен проходить в зоне не дальше 7° от надира для сохранения предположения о ламбертовости поверхности;
- распределение яркостей выбранных пикселей должно быть равномерным с целью обеспечения равномерного распределения величин СПЭЯ по всему динамическому диапазону датчика.
- 4. Расчет параметров абсолютной калибровки.

В настоящее время (2016) информационные продукты стандартной обработки данных КШМСА КА «Ресурс-П», распространяемые Оператором российских космических систем ДЗЗ (НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы»), не включают сведения о параметрах перехода к коэффициентам спектральной яркости (КСЯ). Вместе с тем в соответствии с работой (Блинов, 2012) допустимо предположение о линейном виде функции абсолютной калибровки.

На основе работы (Landsat 7..., 2016), а также результатов моделирования, при кросс-калибровке данных OLI и ШМСА-СР имеет место следующее соотношение:

$$L_{\lambda WMCA}^{*} = k L_{\lambda OLI} \frac{S_{WMCA} \cos \Theta_{WMCA}}{S_{OLI} \cos \Theta_{OLI}},$$
(2.1)

где $S_{\rm OLI}$ — средняя солнечная внеатмосферная энергетическая освещенность для сенсора OLI, Bt/(м²·мкм); $S_{\rm IIIMCA}$ — средняя солнечная внеатмосферная энергетическая

освещенность для сенсора ШМСА-СР, Вт/(м²·мкм); Θ_{OLI} — зенитный угол Солнца для сенсора OLI; $\Theta_{\rm ШМСА}$ — зенитный угол Солнца для сенсора ШМСА-СР; $L_{\lambda OLI}$ — СПЭЯ, фиксируемая сенсором OLI, Вт/(м²·ср·мкм); $L_{\lambda \Pi MCA}^*$ — СПЭЯ, фиксируемая сенсором ШМСА-СР и рассчитанная на основе соответствия спектрального коэффициента отражения на ВГА данных ШМСА-СР и OLI, Вт/(м²·ср·мкм); k — коэффициент, соответствующий среднему отношению СПЭЯ ШМСА-СР и OLI, рассчитанному на этапе численного моделирования (см. *табл. 2*).

Тогда для оценки параметров абсолютной калибровки (с учетом допустимости о линейном характере функции) на отобранном множестве соответствующих пикселей будем использовать следующую математическую постановку задачи:

$$\{gain^*, offset^*\} = \underset{gain, offset}{\operatorname{arg\,min}} \sum_k \left[gain \times (DN)_k + offset - (L^*_{\lambda WMCA})_k\right]^2, \quad (2.2)$$

где $gain^*$ — мультипликативный параметр абсолютной калибровки (параметр чувствительности сенсора ШМСА-СР); Вт/(м²·ср·мкм); *DN* — значение цифрового отсчёта (фиксируемого фотоэлементом ОЭА); *offset*^{*} — аддитивный параметр абсолютной калибровки (коррекция уровня темнового тока ПЗС-матрицы ШМСА-СР), Вт/(м²·ср·мкм).



Рис. 4. Пример маршрутов ШМСА-СР и OLI, используемых для оценки параметров абсолютной калибровки

Для минимизации (2.2) применялся метод RANSAC (Fischler, Bolles, 1981), обеспечивающий при оценке параметров фильтрацию выбросов, неудовлетворяющих выбранной модели.

На *рис. 4* приведено взаимное положение маршрутов ШМСА-СР КА «Ресурс-П» №2 и OLI KA Landsat 8, используемых для определения параметров абсолютной калибровки

в соответствии с предложенной методикой. Желтым цветом отмечены линии, используемые для набора соответствующих пикселей. Построенные скатерограммы представлены на *рис. 5*. Серым цветом отмечены наблюдения, отфильтрованные как выбросы (не более 15...20% всего множества наблюдений), цветом отмечены наблюдения, используемые при расчете параметров.



Рис. 5. Скатерограммы рассчитанных параметров абсолютной калибровки ШМСА-СР спектральных каналов (в порядке слева направо, сверху вниз): синий канал, зелёный канал, красный канал, ближний инфракрасный канал

Исследование динамики изменения параметров абсолютной калибровки данных ШМСА-СР КА «Ресурс-П» № 2

С целью анализа динамики изменения параметров абсолютной калибровки был проведён эксперимент, в рамках которого определены полигоны в США, Африке и Австралии (с учетом минимального уровня атмосферного аэрозоля, оцененного по данным MODIS КА Terra/Aqua и представленного на pecypce http://neo.sci.gsfc.nasa.gov). Запланирована и выполнена съемка территории в период с мая по август 2016 г. Условия съемки и режимы работы аппаратуры были согласованы со специалистами НПП «ОПТЭКС», разработчиками аппаратуры КШМСА. Соотношение общего числа отснятых маршрутов ШМСА-СР и маршрутов, имеющих пересечение с маршрутами OLI KA Landsat 8, показано на *рис. 6*. Для полигона в Австралии из 17 маршрутов были выбраны два, для полигона в США из 20 маршрутов были выбраны пять, для полигона в Африке из 13 маршрутов не было выбрано ни одного маршрута ввиду постоянной облачности. Географическое положение полигонов представлено на *рис. 7*.



Рис. 6. Количество снятых ШМСА-СР маршрутов



Рис. 7. Выбор полигонов для планирования съёмки КШМСА КА «Ресурс-П» № 2

Динамика изменения рассчитанных параметров абсолютной калибровки для всех безоблачных отснятых маршрутов, имеющих пересечение со сценами OLI, представлена

на *рис.* 8. Графики трендов, демонстрирующих стабильность параметров, за исключением отдельного измерения от 29.06.2016, показаны *на рис.* 9. Результаты оценки стабильности параметров абсолютной калибровки относительно результатов экстраполирования линейной регрессией (без учета измерения от 29.06.2016) приведены в *табл.* 3. Природа этого отклонения в совокупности обусловлена следующими факторами: нештатный режим работы аппаратуры; нарушена технология стандартной обработки данных.



Рис. 8. Динамика изменения параметров абсолютной калибровки: а — параметр Gain, Bm/(м²•ср•мкм); б — параметр Offset, Bm/(м²•ср•мкм)

Таблица 3. Оценка стабильности параметров абсолютной калибровки относительно результатов экстраполирования линейной регрессией (без учета измерения от 29.06.2016)

СКО	Blue	Green	Red	NIR
gain, Вт/(м2·ср·мкм)	0,0069	0,005	0,00354	0,007
offset, Вт/(м2·ср·мкм	5,61	4,32	2,55	3,79

Проверка этой гипотезы возможна при анализе большего количества экспериментов по оценке параметров абсолютной калибровки в кооперации с разработчиками КШМСА.



Рис. 9. Тренды параметров Gain, Offset (без учёта измерения от 29.06.2016): а) параметр Gain, Вт/(м²•ср•мкм); б) параметр Offset, Вт/(м²•ср•мкм)

Кроме того, съёмка ШМСА-СР от 15.06.2016 была выбрана в качестве контрольной для апробирования решения спектрометрических задач на основе экстраполирования временного (см. *рис. 9*) ряда параметров абсолютной калибровки. Результаты применения одинаковой палитры к результатам вычисления NDVI на основе параметров абсолютной калибровки, рассчитанных разными методами, представлены на *рис.* 10. В *табл.* 4 приведены результаты вычисления среднеквадратического отклонения рассчитанных значений NDVI по данным ШМСА-СР относительно значений NDVI, найденных по данным OLI.

Подход к оценке параметров абсолютной калибровки	СКО
Не определялись	0,4338
На основе кросс-калибровки	0,0685
Экстраполирование	0,0683

Таблица 4. Сравнение среднеквадратической ошибки вычисления NDVI по контрольным данным для различных подходов к оценке параметров абсолютной калибровки



Рис. 10. Данные NDVI, рассчитанные по данным ШМСА-СР (15.06.2016) (а, б, в) и OLI (16.06.2016) (г) с применением одинаковой палитры; а — цифровые отсчёты; б — кросскалибровка; в — экстраполяция; г — OLI

Заключение

С целью исследования данных КШМСА для решения спектрометрических задач была разработана методика кросс-калибровки по данным OLI Landsat 8 и проведен эксперимент по оценке параметров абсолютной калибровки аппаратуры в период с мая по август 2016 г. На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) данные КШМСА можно использовать для решения спектрометрических задач (с точностью 0,068 на примере NDVI);

2) по параметрам абсолютной калибровки наблюдается стабильность датчика во времени (для каждого из рассматриваемых спектральных каналов):

> СКО чувствительности относительно результатов экстраполирования за рассматриваемый период не превышает 7% среднего значения параметра чувствительности за тот же период;

> СКО величины темнового тока не превышает 6 Вт/(м²·ср·мкм) относительно результатов экстраполирования за рассматриваемый период;

3) отдельные выбросы при оценке параметров абсолютной калибровки требуют уточнения характеристик режимов работы аппаратуры и особенностей технологии стандартной обработки.

Дальнейшие исследования по оценке параметров абсолютной калибровки необходимо проводить в части увеличения периода наблюдений параметров КШМСА, съемки природных тестовых полигонов, адаптации предложенной методики к данным ШМСА-ВР, а также разработки новых подходов и технологий повышения автоматизации данного метода.

Литература

- 1. Антонушкина С.В., Гуров В.С., Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Зенин В.А., Князьков П.А., Козлов Е.П., Кузнецов А.Е., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Побаруев В.И., Пошехонов В.И., Пресняков О.А., Светелкин П.Н. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / ред. В.В. Еремеев. М.: Физматлит, 2015. 460 с. Бакланов А.И., Афонин А.Н., Блинов В.Д., Забиякин А.С. КШМСА — комплекс широкозахватной мульти-
- 2. спектральной аппаратуры космического аппарата «Ресурс-П» // Вестн. Самарского гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. С.П. Королёва (нац. исслед. ун-та). 2016. Т. 15. №2. С. 22–29. DOI:10.18287/2412-7329-2016-15-2-22-29.
- 3. *Блинов В.Д.* Комплекс широкозахватной мультиспектральной аппаратуры. Методика расчета времени на-копления. ЦТЕА 1.701.074 Д5. НПП «ОПТЭКС», 2012. 21 с.
- 4. Василейский А.С., Жуков Б.С., Жуков С.Б., Куркина А.Н., Полянский И.В. Относительная радиометрическая калибровка комплекса многозональной спутниковой съемки (КМСС) // Всерос. научно-технич. конф. «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов». Таруса, 22–25 сент. 2008: сб. тр. ИКИ РАН, 2009. С. 562–574.
- 5. Васильев А.И. Калибровка съемочной аппаратуры космического аппарата «Канопус-В» в процессе его эксплуатации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. Č. 203–214.
- Васильев А.И. Эксперимент по автоматической оценке облачности на основе данных ШМСА-СР КА «Ре-6. сурс-П» // Тез. докл. 4-й Международной научно-технич. конф. «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. С. 172–174.
- 7. Васильев А.И., Ольшевский Н.А., Коршунов А.П., Стремов А.С. Программные технологии создания и распространения базовых продуктов дистанционного зондирования Земли // Ракетно-космическое приборо-строение и информационные системы. 2015. Т. 2. Вып. 3. С. 23–32. ВасильевА.И., СтремовА.С., МорозовЕ.А. Методы верификации базовых продуктов ДЗЗмежведомственного
- 8. ВисильевА.И., СтремовА.С., Морозов.Е.А. Методыверификацииоазовых продуктов дозмежведомственного использования // 13-я Всерос. открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 16–20 ноября 2015: тез. докл. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/the-sisshow.aspx?page=109&thesis=5105 (2016). Гришанцева Л.А., Емельянов А.А., Емельянов К.С., Куревлева Т.Г., Марков В.С., Рыбкин А.С. К вопросу о спектральной калибровке данных ГСА КА «Ресурс-П» № 1 // 12-я Всерос. открытая конф. «Современные
- 9. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 10–14 ноября 2014: тез. докл. URL:
- http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4844 (2016).
 Жуков Б.С., Кондратьева Т.В., Полянский И.В., Пермитина Л.И. Полетная радиометрическая кросс-калибровка комплекса многозональной спутниковой съемки на КА «Метеор-М» № 1 по спектрорадиометру MODIS на КА Тегга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. T. 11. № 2. C. 123–137.
- 11. Катаманов С.Н. Разработка автоматического метода географической привязки изображений МСУ-МР полярно-орбитального спутника «Метеор-М» № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 276-285.

- 12. Кондратьева Т.В., Жуков Б.С., Полянский И.В., Форш А.А. Сопоставление коэффициентов яркости природных объектов по данным КМСС на КА «Метеор-М» № 1 и MODIS на КА Тегга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 215–224.
- 13. Королев Е.Е., Кочергин А.М., Кузнецов А.Е., Побаруев В.И. Автоматическая сегментация облачных объектов на снимках земной поверхности высокого пространственного разрешения // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. URL: http://science-education.ru/ru/article/view?id=15042 (2016).
- Кузнецов А.Е., Побаруев В.И., Пошехонов В.И., Пресняков О.А. Программный комплекс обработки информации от сканерно-кадровых съемочных систем КА «Канопус-В» и «БКА» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 287–300.
 Куревлева Т.Г., Рыбкин Е.С., Стремов А.С., Тихонычев В.В. Калибровка данных МСС/Канопус-В по
- Куревлева Т.Г., Рыбкин Е.С., Стремов А.С., Тихонычев В.В. Калибровка данных МСС/Канопус-В по данным Landsat-8 // 13-я Всерос. открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 16–20 ноября 2015: тез. докл. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/ thesisshow.aspx?page=109&thesis=5469 (2016).
- Лобзенев В.Н., Логванев И.Г. Полный цикл обработки материалов ДЗЗ в ПК ІМС // 14-я Международная научно-технич. конф. «От снимка к карте: цифровые фотограмметрические технологии». Хайнань, Китай, 18–24 окт. 2014. М.: Ракурс, 2014. С. 13–19.
- 17. Марков А.Н., Васильев А.И., Ольшевский Н.А., Коршунов А.П., Михаленков Р.А., Салимонов Б.Б., Стремов А.С. Архитектура геоинформационного сервиса «Банк базовых продуктов» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 39–51.
- 18. Силюк О.О., Катковский Л.В. Методика и результаты кросс-калибровки изображений Белорусского космического аппарата и других съемочных систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 261–270.
- Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 261–270.
 19. *Fischler M.A., Bolles R.C.* Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography // Communications of the ACM. 1981. Vol. 24. Issue 6. P. 381–395.
- Landsat 7 Science Data Users Handbook // Landsat Science / NASA Official: James R. Irons, Curators: Laura Rocchio. URL: http://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf (2016).

Study of Resurs-P wide-swath multispectral equipment data applicability to spectrometric tasks

A.I. Vasilyev, A.S. Stremov, V.P. Kovalenko

JSC "Russian Space Systems", Research Center for Earth Operative Monitoring Moscow 127490, Russia E-mail: nova@ntsomz.ru

The paper describes the results of applicability study of the optoelectronic wide-swath multispectral equipment (KShMSA) carried by the Resurs-P spacecraft in spectrometric tasks. For this purpose, the procedure to estimate the absolute radiometric calibration parameters of the Resurs-P medium resolution wide-swath multispectral instrument (ShMSA-SR) by comparing with the data of Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) was developed. The sensors's spectral bands consistency was estimated using the MODTRAN software: test-object imaging was simulated under the same conditions and the top-of-atmosphere (TOA) spectral radiances of both sensors were calculated. The imaging of several test sites was carried out during the period between May to August 2016. The dynamics of the ShMSA-SR absolute calibration parameters was analyzed using the space imagery results. The results obtained demonstrate the absolute calibration parameter stability (by sensitivity — RMSE is no more than 7% of spectral band averaged sensitivity and by dark current — RMSE is within 5.6 W/(m²·sr·µm)) and the applicability of the KShMSA data in solving spectrometric tasks (with the accuracy of no worse than 0.068 using NDVI as an example).

Keywords: remote sensing, spectroradiometer, wide-swath multispectral equipment, Resurs-P spacecraft, absolute calibration parameters, cross-calibration, dynamics of absolute calibration parameters

Accepted: 17.05.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-36-51

References

 Antonushkina S.V., Gurov V.S., Egoshkin N.A., Eremeev V.V., Zenin V.A., Knyaz'kov P.A., Kozlov E.P., Kuznetsov A.E., Makarenkov A.A., Moskvitin A.E., Pobaruev V.I., Poshekhonov V.I., Presnyakov O.A., Svetelkin P.N., Sovremennye tekhnologii obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli (Contemporary processing technologies of Earth remote sensing data), Moscow: Fizmatlit, 2015, p. 460.

- Baklanov A.I., Afonin A.N., Blinov V.D., Zabiyakin A.S., KShMSA kompleks shirokozakhvatnoi mul'tispektral'noi apparatury kosmicheskogo apparata "Resurs-P" (KShMSA – The system of wide swath multispectral apparatus "Resurs-P"), *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S.P. Koroleva* (Vestnik of S.P. Korolev Samara State University), 2016, Vol. 15, No. 2, pp. 22–29. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-22-29.
- 3. Blinov V.D., *Kompleks shirokozakhvatnoi mul'tispektral'noi apparatury. Metodika rascheta vremeni nakopleniya. CTEA 1.701.074 D5* (The system of wide swath multispectral apparatus. Technique of acquisition interval estimation. CTEA 1.701.074 D5), NPP "OPTEKS" (SPE "OPTEKS"), 2012, 21 p.
- 4. Vasileiskii A.S., Zhukov B.S., Zhukov S.B., Kurkina A.N., Polyanskii I.V. Otnositel'naya radiometricheskaya kalibrovka kompleksa mnogozonal'noi sputnikovoi s"emki (Relative radiometric calibration of the system of many spectral satellite acquisition), *Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy opredeleniya orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (All-Russian scientific-technical conference "Modern problems of definition of spacecrafts orientation and navigation"), Tarusa, 22–25 September 2008, Sbornik trudov, IKI RAN, 2009, pp. 562–574.
- Sbornik trudov, IKI RAN, 2009, pp. 562–574.
 Vasil'ev A.I., Kalibrovka s"emochnoi apparatury kosmicheskogo apparata "Kanopus-V" v protsesse ego ekspluatasii (Calibration of "Kanopus-V" satellite sensor during its operation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 203–214.
- Vasil'ev A.I., Eksperiment po avtomaticheskoi otsenke oblachnosti na osnove dannykh ShMSA-SR KA "Resurs-P" (Experimentation of automatic cloud coverage assessment based on ShMSA-SR "Resurs-P" data), Tezisy dokladov Chetvertoi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "*Aktual'nye problemy sozdaniya kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli*" (Proceedings of 4th International Scientific-Technical Conference "Actual Problems of Space Earth Remote Sensing Systems Development"), Moscow, AO "Korporatsiya "VNIIEM", 2016, pp. 172–174.
 Vasil'ev A.I., Ol'shevskii N.A., Korshunov A.P., Stremov A.S. Programmye tekhnologii sozdaniya i raspros-
- 7. Vasil'ev A.I., Ol'shevskii N.A., Korshunov A.P., Stremov A.S. Programmnye tekhnologii sozdaniya i rasprostraneniya bazovykh produktov distantsionnogo zondirovaniya Zemli (Software Technologies for Generation and Distribution of Basic Earth Remote Sensing Data Products), *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2015, Vol. 2, Issue 3, pp. 23–32.
- Vasil⁵ev A.I., Štremov A.S., Morozov È.A., Metody verifikatsii bazovykh produktov DZZ mezhvedomstvennogo ispol²zovaniya (Basic Earth Remote Sensing Data Products Verification Methods), *13 Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (13th Conf. "Current Problems of Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow, 16–20 November 2015, Book of Abstracts, available at: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5105 (2016).
- 9. Grishantseva L.A., Emel'yanov A.A., Emel'yanov K.S., Kurevleva T.G., Markov V.S., Rybkin A.S., K voprosu o spektral'noi kalibrovke dannykh GSA KA "Resurs-P" No. 1 (To the problem of spectral calibration of GSA "Resurs-P" data), 12 konf. "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (12th Conf. "Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, available at: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4844 (2016).
- Zhukov B.S., Kondrat'eva T.B., Polyanskii I.V., Permitina L.I., Poletnaya radiometricheskaya kross-kalibrovka kompleksa mnogozonal'noi sputnikovoi s''emki na KA "Meteor-M" No. 1 po spektroradiometru MODIS na KA Terra (In-flight radiometric cross-calibration of Multispectral Satellite Imaging System on-board "Meteor-M" No. 1 relative to spectroradiometer MODIS on-board Terra), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 123–137.
- 11. Katamanov S.N., Razrabotka avtomaticheskogo metoda geograficheskoi privyazki izobrazhenii MSU-MR polyarno-orbital'nogo sputnika "Meteor-M" No. 1 (Development of automatic navigation method for MSU-MR imagery of polar-orbital satellite "Meteor-M" No. 1), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 276–285.
- Kondrat'eva T.V., Zhukov B.S., Polyanskii I.V., Forsh A.A., Sopostavlenie koeffitsientov yarkosti prirodnykh ob"ektov po dannym KMSS na KA "Meteor-M" No. 1 i MODIS na KA Terra (Comparison of reflectances of natural objects from "Meteor-M" No. 1 Multispectral Satellite Imaging System and Terra MODIS spectroradiometer), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 215–224.
- Korolev E.E., Kochergin A.M., Kuznetsov A.E., Pobaruev V.I., Avtomaticheskaya segmentatsiya oblachnykh ob"ektov na snimkakh zemnoi poverkhnosti vysokogo prostranstvennogo razresheniya (Automatic segmentation of cloud objects on Earth imagery of high spatial resolution), *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2014, No. 5, available at: http://science-education.ru/ru/article/view?id=15042 (2016).
- Kuznetsov A.E., Pobaruev V.I., Poshekhonov V.I., Presnyakov O.A. Programmnyi kompleks obrabotki informatsii ot skanerno-kadrovykh s"emochnykh sistem KA "Kanopus-V" i "BKA" (A software system for information processing from scanner-frame imaging systems "Kanopus-V" and "BKA"), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 287–300.
 Kurevleva T.G., Rybkin E.S., Stremov A.S., Tikhonychev V.V., Kalibrovka dannykh MSS/"Kanopus-V" po dan-
- Kurevleva T.G., Rybkin E.S., Stremov A.S., Tikhonychev V.V., Kalibrovka dannykh MSS/"Kanopus-V" po dannym Landsat-8 (MSS/Kanopus-V data calibration on Landsat 8 data), XIII Vseros. otkrytaya konf. "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa", (13th Conf. "Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow, 16–20 November 2014, Book of Abstracts, available at:http://smiswww.iki. rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5469 (2016).
 Lobzenev V.N., Logvanev I.G., Polnyi tsikl obrabotki materialov DZZ v PK IMC (A full cycle of Earth remote
- Lobzenev V.N., Logvanev I.G., Polnyi tsikl obrabotki materialov DZZ v PK IMC (A full cycle of Earth remote sensing data processing in the IMC), 14-ya Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. "Ot snimka k karte: tsifrovye fotogrammetricheskie tekhnologii" (14th International Scientific and Technical Conference "From imagery to map: digital photogrammetric technologies"), Khainan', Kitai, 18–24 October 2014, Moscow, Rakurs, 2014, pp. 13–19.
- 17. Markov A.N., Vasil'ev A.I., Ol'shevskii N.A., Korshunov A.P., Mikhalenkov R.A., Salimonov B.B., Stremov A.S., Arkhitektura geoinformatsionnogo servisa "Bank bazovykh produktov" (Architecture of the Basic Product Bank geoinformation service), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 39–51.

- 18. Silyuk O.O., Katkovskii L.V., Metodika i rezul'taty kross-kalibrovki izobrazhenii Belorusskogo kosmicheskogo apparata i drugikh s"emochnykh sistem (Methods and results of image cross-calibration of the Belarusian satellite and other sensors), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2016, Vol. 13, No. 4,
- and other sensors), *Sovremennye problemy distantstonnogo zonan oraniya zenne iz nesmosa*, zere, ren re, ren r, pp. 261–270.
 19. Fischler M.A., Bolles R.C., Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, June 1981, *Communications of the ACM* 24 (6), pp. 381–395.
 20. Landsat 7 Science Data Users Handbook, Landsat Science, NASA Official: James R. Irons, Curators: Laura Rocchio, available at: http://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf (2016).