## Стандартная обработка данных КШМСА КА «Ресурс-П» в обеспечение автоматического формирования бесшовного сплошного покрытия

#### А.И. Васильев, А.В. Крылов, А.В. Панкин

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

В статье рассматриваются основные алгоритмические решения стандартной обработки данных комплекса широкозахватной мультиспектральной аппаратуры (КШМСА) космического аппарат (КА) «Ресурс-П», разработанные с целью автоматического формирования бесшовного сплошного покрытия (БСП). Во-первых, приведена геометрическая модель съёмочной системы и результаты её калибровки. Во-вторых, предлагается метод относительной радиометрической коррекции, обеспечивающий контроль радиометрической однородности по всему полю изображения. В-третьих, рассмотрены особенности фотограмметрической обработки данных КШМСА до уровня 1D CEOS, включая контроль и уточнение географической привязки. Приведена технология автоматизированного формирования БСП по данным КШМСА с использованием фотограмметрических пакетов, при этом в обеспечение автоматического построения БСП отмечена необходимость маскирования облачности. Предложен алгоритм классификации облачных пикселей для данных КШМСА. На примере данных ШМСА-ВР КА «Ресурс-П» № 1, 2 (15 маршрутов) на территорию Самарской обл. за летние периоды 2015 и 2016 гг. полностью автоматически выполнена стандартная обработка от уровня 0 до уровня 1D CEOS, включая маскирование облачности, и автоматически сформировано БСП (с использованием программного обеспечения Photomod).

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, космический аппарат «Ресурс-П», комплекс широкозахватной мультиспектральной аппаратуры, стандартная обработка, бесшовное сплошное покрытие, мозаика

Одобрена к печати: 19.03.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-18-28

#### Введение

Многолетний опыт использования данных зарубежных космических систем (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) типа Landsat для решения задач природно-ресурсного мониторинга, например оценки состояния сельхозугодий (Leslie et al., 2017), фактически определил требования к уровню обработки, качеству и полноте предоставляемой потребителям космической информации. В целом достаточно подробно классификация уровней обработки, а также основные требования к данным, включая особенности соответствующих уровней обработки информационных продуктов ДЗЗ, рассмотрены в работе (Лупян, Саворский, 2012). Для продуктов стандартной обработки (СП — стандартный продукт) кратко приведём ключевые характеристики: пиксельная точность географической привязки спектральных каналов; радиометрическая однородность по всему полю изображения; данные сопровождаются валидированными параметрами перехода к физическим величинам (для оптико-электронной аппаратуры это спектральная плотность энергетической яркости), а также масками качества и облачности; опционально выполняется атмосферная коррекция. Эти требования являются критическими при автоматическом формировании информационных продуктов более высокого уровня, в частности базовых продуктов (Васильев и др., 2016; Марков и др., 2016) и БСП на заданный район и период времени (Kang et al., 2016; Ramoino et al., 2017).

Среди российских оптико-электронных приборов ДЗЗ среднего разрешения (GSD — Ground Sample Distance, 10–100 м) следует выделить комплекс широкозахватной мультиспектральной аппаратуры (КШМСА) КА «Ресурс-П» (Бакланов и др., 2016). Эта аппаратура оборудована двумя сенсорами: 1) ШМСА-СР — обеспечивает полосу обзора более 400 км и GSD 60 (120) м; 2) ШМСА-ВР — обеспечивает полосу обзора около 100 км и GSD 12 (24) м. При этом сенсор ШМСА-ВР близок по своим тактико-техническим характеристикам (набор спектральных каналов и пространственное разрешение) к зарубежным сенсорам Д33 среднего разрешения OLI/ETM+ Landsat и MSI Sentinel, широко используемым при решении задач природно-ресурсного мониторинга.

В рамках данной работы предлагаются алгоритмические решения стандартной обработки данных КШМСА КА «Ресурс-П» (геометрическая и радиометрическая коррекция), обеспечивающие качество продуктов, приемлемое для автоматического формирования БСП с использованием фотограмметрических пакетов общего назначения.

#### Геометрическая калибровка съёмочной системы

Технология зондирования КШМСА соответствует модели "push-broom", поэтому в основе геометрической модели съёмочной системы (*puc. 1*) использовалась RS-модель (RS — Rigorous Sensor) сканирующего линейного сенсора (Poli, 2007), в данном случае определяемая в следующем виде:

$$\vec{R} = \vec{R}_0(t) + \vec{R}_C + m\mathbf{A}_0(t)\mathbf{A}_C \left(\vec{\xi}(t)\right) \cdot \begin{bmatrix} x & y & -f \end{bmatrix}^T,$$

где  $\vec{R}$  — положение наблюдаемой точки местности в абсолютной системе координат;  $\{\vec{R}_0(t); \mathbf{A}_0(t)\}$  — линейное и угловое (матрица поворотов) положение КА на заданный момент времени *t* (значения этих величин определяются полиномами линейного и углового положения как результат интегрирования показаний навигационных датчиков и поставляемых в составе данных КШМСА уровня 0 CEOS);  $\{\vec{R}_C; \mathbf{A}_C(\vec{\xi}(t))\}$  — поправки линейного и углового положения (матрица поворотов) сенсора для заданного момента времени *t*, при этом допускаем, что  $\vec{R}_C = \text{const}$  и  $\vec{\xi}(t) = \vec{\xi}_0 + (t-t_0) \cdot \dot{\vec{\xi}}$ , где  $t_0$  — начало съёмки;  $\vec{\xi}_0$  — поправка углового положения в момент времени  $t_0$ ;  $\dot{\vec{\xi}} = \text{const}$  — поправка скорости изменения углового положения; *m* — масштабный множитель; *f* — фокусное расстояние оптической системы; {*x*; *y*} — положение образа наблюдаемой точки местности в фокальной плоскости, скорректированное с учётом параметров внутреннего ориентирования (радиальной дисторсии и положения ПЗС-матрицы соответствующего спектрального канала относительно оптического центра).



Рис. 1. Схема расположения проекций на местность элементов ПЗС-линеек камер ШМСА-ВР и ШМСА-СР относительно друг друга и относительно направления полёта (НП) космического аппарата. Рисунок заимствован из работы (Бакланов и др., 2016)

Геометрическая калибровка (оценка параметров внутреннего ориентирования) выполнялась на основе решения задачи минимизации невязок на опорных точках, указанных для всех спектральных каналов, при этом дополнительно оценивались параметры поправок линейного и углового положения. Для калибровки применялась опорно-измерительная информация системы валидационных подспутниковых наблюдений (Бочарников и др., 2015), а также опорные точки, измеренные по данным OLI KA Landsat-8 и цифровой модели рельефа (ЦМР) SRTM (https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc). Результаты экспериментов показали точность оценки параметров внутреннего ориентирования лучше одного пикселя. В *табл. 1* приведены остаточные невязки геометрической калибровки ШМСА-ВР КА «Ресурс-П» № 1, полученные при ориентировании одного маршрута ШМСА-ВР (дата съёмки — 26.07.2015, Московская обл.). При этом для калибровки было измерено более 100 опорных точек для каждого спектрального канала данных ШМСА-ВР.

Таблица 1. Остаточные невязки в результате геометрической калибровки ШМСА-ВР КА «Ресурс-П» № 1 (дата съёмки — 26.07.2015, Московская обл.)

Спектральный канал, мкм	СКО по оси столбцов/строк, пиксели			
PAN (0,43-0,7)	0,7454	0,7957		
BLUE (0,43-0,51)	0,4048	0,5779		
GREEN (0,51-0,58)	0,3537	0,5457		
RED (0,6-0,7)	0,4352	0,5916		
NIR1 (0,7–0,9)	0,7010	0,7449		
NIR2 (0,8–0,9)	0,7043	0,7428		

#### Относительная радиометрическая коррекция

В качестве основных дефектов радиометрической однородности данных КШМСА следует выделить «полосатость» изображений и виньетирование, характерное для ШМСА-СР и устранимое по результатам наземной радиометрической калибровки. Для ликвидации дефекта «полосатости» выполнялась оценка корректирующих параметров, мультипликативного и аддитивного, для каждого элемента/столбца ПЗС-линейки на основе решения задачи многопараметрической минимизации:

$$\sum_{k} \sum_{i=1}^{n_{k}} \frac{\left(\left(a_{k} I_{i}^{k} + b_{k}\right) - \left(a_{k+1} I_{i}^{k+1} + b_{k+1}\right)\right)^{2}}{n_{k}} + \sum_{k} \left(a_{k} - 1\right)^{2} + \sum_{k} \left(b_{k}^{2} - 1\right)^{2} + \sum_{k} \left(a_{k} - 1\right)^{2} + \sum_{k} \left(a_$$

где  $\{a_k, b_k\}$  — соответственно мультипликативная и аддитивная поправка *k*-го столбца (соответствует *k*-му элементу ПЗС);  $I_i^k$  — величина цифрового отсчета в *i*-й строке *k*-го столбца, для которого выполняется условие наблюдения «одного и того же объекта» на основе следующих ограничений:  $\left|\ln\left(I_i^k/I_i^{k+1}\right)\right| < [\alpha], |I_i^k - I_i^{k+1}| < [\beta], где \alpha, \beta$  — параметры алгоритма;  $n_k$  — количество элементов в *k*-м и (*k*+1)-м столбце, для которых выполняется условие наблюдения «одного и того же объекта».

На *рис. 2* (см. с. 21) приведён пример обработки данных (фрагмент) панхроматического канала ШМСА-ВР КА «Ресурс-П» № 1 (дата съёмки — 02.05.2016, Картахена, Испания), при этом ошибка радиометрической «неоднородности» составила: среднеквадратическое отклонение (СКО) и максимальная ошибка для исходных данных — 12,7 и 77,8 соответственно, после коррекции — 0,95 и 3,5.

На практике для радиометрической коррекции применялась двухэтапная схема. На первом этапе выбирался некоторый опорный/калибровочный маршрут, для которого решалась задача минимизации. В качестве калибровочных маршрутов выбирались сцены, на которых зафиксированы низкие и высокие величины цифровых отсчётов, как правило, включающие снежный покров и водную поверхность (например, для КА «Ресурс-П» № 1: дата съёмки — 26.01.2017, Антарктида). На втором этапе для всех маршрутов (в частности, за 2015–2018 гг.) коррекция выполнялась на основе параметров, рассчитанных по калибровочному маршруту.



Рис. 2. Пример относительной радиометрической коррекции фрагмента данных панхроматического канала ШМСА-ВР КА «Ресурс-П» № 1 (дата съёмки — 02.05.2016, Картахена, Испания): *слева* — ис-ходные данные, *справа* — результат обработки

## Особенности фотограмметрической обработки

Технология фотограмметрической обработки данных КШМСА до уровня 1С CEOS (трансформирование на «среднюю» плоскость) основывается на аппроксимации RS-модели дробно-рациональными полиномами (Grodecki, Dial, 2001), которые для краткости будем называть RPC-моделью (RPC — Rational Polynomial Coefficients). При этом особенности геометрии фокальной плоскости сенсора КШМСА, а именно сильно разнесённые положения ПЗС-матриц спектральных каналов видимого диапазона PAN-RGB и NIR-каналов, обуславливают попиксельное сведение спектральных каналов только для данных уровня 1D CEOS путём ортотрансформирования изображений спектральных каналов с учётом ЦМР. Для попиксельного сведения спектральных каналов данных уровня 1B/1C CEOS необходимо проводить перепроецирование изображений NIR-каналов к каналам видимого диапазона PAN-RGB (с учётом ЦМР и при условии достаточной точности навигационных данных). Вместе с тем для формирования продуктов более высоких уровней обработки, в частности базовых продуктов или бесшовных покрытий, предпочтительно использовать данные уровня 1D CEOS, поэтому решение задачи попиксельного сведения изображений спектральных каналов данных КШМСА уровня 1B/1C CEOS не представлялось целесообразным в рамках настоящей работы.

Ввиду ограниченной точности навигационных датчиков КА, а также наличия сбоев (например, паразитные засветки и блики в поле зрения звёздных датчиков) реализован входной контроль точности географической привязки. Решение этой задачи основывается на сопоставлении данных КШМСА уровня 1С CEOS и OLI КА Landsat-8 уровня 1D CEOS, имеющих известную точность геореференцирования — около 11 м. При этом спектральные каналы видимого диапазона КШМСА сопоставлялись с панхроматическим каналом OLI, NIR-каналы КШМСА — с NIR-каналом OLI. Для поиска соответствий (опорных точек) применялся алгоритм SIFT (Lowe, 2004) на основе реализации (Vasilyev et al., 2011), а оценка аффинных поправок RPC-модели осуществлялась на основе решения задачи минимизации:

$$\sum_{i} \left[ \vec{p}_{i} - \mathbf{U} \cdot \begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \right]^{2} \to \min,$$

где  $\{\vec{p}, \vec{q}\}$  — пиксельные координаты соответствия, найденного на изображениях спектрального канала КШМСА и OLI соответственно;  $\vec{p}' = [u \ v]^T = \vec{F}(\vec{R})$  — результат расчёта пиксельных координат точки  $\vec{R}$  на основе дробно-рациональных полиномов  $\vec{F}(\vec{R})$  заданного спектрального канала КШМСА, при этом геодезические координаты  $\vec{R} = \begin{bmatrix} L & B & H \end{bmatrix}^T$  рассчитаны на основе параметров геореференцирования сцены OLI для пиксельных координат точки  $\vec{q}$  найденного соответствия (высота точек H оценивалась на основе данных SRTM); U — матрица аффинных поправок (2×3).

Для оценки аффинных поправок с учётом фильтрации неправильных соответствий применялся метод RANSAC (Fischler, Bolles, 1981). На *рис. 3* приведены результаты поиска опорных точек для сцены ШМСА-ВР КА «Ресурс-П» № 1 (дата съёмки — 05.03.2017, Республика Крым), при этом с целью покрытия всей области изображения ШМСА-ВР для сопоставления использовалось три сцены Landsat-8, хотя опорные данные обеспечивают покрытие четырьмя сценами.



Рис. 3. Фрагмент сцены панхроматического канала ШМСА-ВР КА «Ресурс-П» № 1 (дата съёмки — 05.03.2017, Республика Крым): на заднем фоне отображены сцены Landsat-8 (включая их границы), каждая из которых представлена в однотонном цвете; найденные опорные точки отмечены оранжевым цветом

В *табл. 2* приведена точность геореференцирования спектральных каналов сцены на основе RS- и RPC-моделей. При этом были рассмотрены следующие варианты: 1) уточнение параметров RPC-модели на основе найденных аффинных поправок для каждого спектрального канала независимо; 2) уточнение параметров RS-модели на основе найденных опорных точек для каждого спектрального канала независимо; 3) уточнение параметров RS-модели на основе результатов геометрической калибровки сенсора и найденных опорных точек только для панхроматического канала. Сопоставимость всех полученных результатов (СКО остаточ-

ных невязок — менее одного пикселя при максимальных невязках (Макс) менее 1,6 пикселя) *табл. 2* позволяет верифицировать качество геометрической калибровки, а также допустимость аппроксимации RS-модели дробно-рациональными полиномами.

Канал	RPС-модель, сопоставление всех каналов			RS-модель, сопоставление всех каналов		RS-модель, сопоставление только PAN-канала		
	CKO, x	CKO, y	Макс, х	Макс, у	CKO, x	CKO, y	CKO, x	CKO, y
PAN	0,650	0,683	1,555	1,584	0,656	0,690	0,657	0,693
В	0,565	0,553	1,428	1,558	0,482	0,557	0,545	0,589
G	0,560	0,549	1,421	1,505	0,467	0,561	0,551	0,581
R	0,571	0,588	1,497	1,560	0,476	0,612	0,574	0,644
NIR1	0,611	0,561	1,457	1,428	0,531	0,557	0,808	0,592
NIR2	0,618	0,614	1,499	1,453	0,529	0,600	0,799	0,700

Таблица 2. Точность геореференцирования (в пикселях) спектральных каналов сцены ШМСА-ВР КА «Ресурс-П» № 1 (дата съёмки — 05.03.2017, Республика Крым) с использованием RS- и RPC-моделей

#### Технология формирования бесшовного сплошного покрытия

Современные фотограмметрические пакеты обработки данных ДЗЗ (например, ERDAS Imagine или Photomod) обеспечивают возможность автоматизированного построения бесшовных сплошных покрытий по данным ДЗЗ. Обобщённая технология формирования БСП в этих пакетах включает следующие основные этапы для данных уровня 1D CEOS: 1) загрузки данных и формирование проекта; 2) расчёт и редактирование линий порезов (под этой линией понимается граница в зоне перекрытия двух и более изображений, которая определяет области растровых данных, используемых при формировании результирующего БСП); 3) расчёт и редактирование параметров яркостного выравнивания; 4) формирование единого растрового изображения.

Анализ архивов НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы» (Оператора российских КС ДЗЗ) на наличие данных ШМСА-ВР КА типа «Ресурс-П» с приемлемым уровнем облачности (не более 30 %) показал возможность формирования регламентированного БСП на регионы РФ не чаще чем раз в два года. Соответственно, назначение таких покрытий ограничивается преимущественно картографическими задачами. Для ежегодного регламентированного формирования БСП с пространственным разрешением не хуже 12–15 м данные КШМСА КА типа «Ресурс-П» необходимо дополнить данными КА Sentinel/Landsat.

В рамках настоящей работы в качестве тестового региона была рассмотрена Самарская обл. Из архивов НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы» были отобраны 15 маршрутов ШМСА-ВР КА «Ресурс-П» № 1, 2 за летние периоды 2015 и 2016 гг. и обработаны до уровня 1D CEOS полностью в автоматическом режиме с использованием программного обеспечения, разработанного на основе алгоритмов, описанных в данной статье. Далее с использованием фотограмметрического пакета ERDAS Imagine выполнено автоматизированное (с участием оператора) построение БСП (*рис. 4*, см. с. 24). Одной из значимых причин автоматизированного режима формирования БСП являлся контроль линий порезов и яркостного выравнивания вследствие наличия на изображениях облачных формаций. Их присутствие является причиной того, что яркие пиксели изображений облаков ухудшают расчётные параметры яркости и контраста результирующего БСП, а также скрывают подстилающую поверхность.

Вследствие отсутствия коротковолновых и тепловых каналов в составе аппаратуры КШМСА КА «Ресурс-П» для маскирования облачности алгоритмы типа ACCA (Hollingsworth et al., 1996) или F-mask (Zhu, Woodcock, 2012) не применимы в полной мере. Вместо этого был разработан эвристический алгоритм, задействующий только данные спектральных каналов видимого диапазона сенсора КШМСА и учитывающий особенности прибора. Для этого,

во-первых, осуществлялась нормализация величин цифровых отсчётов, фиксируемых при различных режимах работы ПЗС-матриц (соответствующих разному времени накопления зарядов), на основе методики, приведённой в спецификации (Блинов, Квитка, 2012). Для скорректированных величин цифровых отсчётов применялись коэффициенты перехода к величинам спектральной плотности энергетической яркости, оцененные в рамках работ (Васильев и др., 2017а, б), и пересчёт к спектральным коэффициентам отражения на верхней границе атмосферы. И во-вторых, в качестве модели классификатора использовался каскадный пороговый фильтр, подбор параметров которого осуществлялся на основе граничных значений гистограмм, формируемых на основе данных обучающей выборки (использовалось более 10 маршрутов данных КШМСА с маркированными пикселями облачных объектов для различных регионов РФ). Решающее правило при формировании маски облачности имело следующий вид:

$$R = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{1}{N} \sum_{i} \operatorname{sign}(\rho_i - \theta_i) \right],$$

где N — количество спектральных каналов сцены;  $\rho_i$  — величина спектрального коэффициента отражения на верхней границе атмосферы *i*-го канала;  $\theta_i$  — пороговый параметр *i*-го канала (определялся на основе обучающей выборки); sign(x) — кусочно-постоянная функция, определяющая знак аргумента.



Рис. 4. БСП, сформированное в автоматизированном режиме на территорию Самарской обл. по данным ШМСА-ВР КА «Ресурс-П» № 1, 2 за летние периоды 2015 и 2016 гг.



Рис. 5. Пример маскирования облачности по данным ШМСА-ВР КА «Ресурс-П» № 1 (дата съёмки — 10.06.2015, Самарская обл.): слева — исходные данные, справа — результаты маскирования

Дополнительно для маскированных облаков выполнялась генерализация на основе операторов дилатации и эрозии (морфологического расширения и уменьшения). На *рис. 5* (см. с. 24) показан результат маскирования облачности для маршрута ШМСА-ВР КА «Ресурс-П» № 1 (дата съёмки — 10.06.2015, Самарская обл.).



Рис. 6. БСП на территорию Самарской обл. по данным ШМСА-ВР КА «Ресурс-П» № 1, 2 за летние периоды 2015 и 2016 гг. (сформировано с учётом маскирования облачности)

На *рис. 6* приведено БСП, сформированное в автоматическом режиме (с использованием фотограмметрического пакета Photomod, поддерживающего возможность импорта результатов маскирования) на основе данных ШМСА-ВР на территорию Самарской обл. за летние периоды 2015 и 2016 гг.

#### Заключение

В статье рассмотрены основные алгоритмические решения стандартной обработки данных КШМСА КА типа «Ресурс-П» в обеспечение формирования БСП. Для этого разработана математическая модель съёмочной аппаратуры и проведена её геометрическая калибровка с точностью не хуже одного пикселя. Проанализированы дефекты радиометрической «неоднородности» сенсора, предложен подход к устранению «полосатости», позволяющий повысить качество изображения на порядок (СКО ошибки до коррекции — ~12 величин цифровых отсчётов, после коррекции — менее 1). Рассмотрены особенности фотограмметрической обработки данных КШМСА, в частности формирование изображений уровня 1С СЕОS (трансформирование на «среднюю» плоскость), попиксельное сведение спектральных каналов, а также оценка и уточнение географической привязки.

С использованием фотограмметрического пакета ERDAS Imagine выполнено (в автоматизированном режиме) построение БСП на территорию Самарской области по данным ШМСА-ВР КА «Ресурс-П» № 1, 2 за летние периоды 2015 и 2016 гг. Отмечена необходимость маскирования облачности для полностью автоматической обработки. Для этого предложен алгоритм маскирования облачности, результаты которого были применены к тем же данным на территорию Самарской обл., и автоматически сформировано БСП (с использованием фотограмметрического пакета Photomod, поддерживающего возможность импорта результатов маскирования).

### Литература

- 1. Бакланов А. И., Афонин А. Н., Блинов В. Д., Забиякин А. С. КШМСА комплекс широкозахватной мультиспектральной аппаратуры космического аппарата «Ресурс-П» // Вестн. Самарского гос. аэрокосм. ун-та им. акад. С. П. Королёва (нац. исследоват. ун-та). 2016. Т. 15. № 2. С. 22–29.
- 2. *Блинов В.Д., Квитка В.Е.* Комплекс КШМСА. Описание алгоритмов наземной обработки информации КШМСА в изделии 47КС. Ч. 3: Алгоритм № 3 КШ. ЦТЕА 1.701.074 Д 4.2. НПП «ОПТЭКС», 2012. 12 с.
- Бочарников А. И., Жиличкин А. Г., Коваленко В. П., Кондратов А. В., Тихонычев В. В., Худяков А. В. Технологии определения характеристик целевой аппаратуры КК ДЗЗ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2. Вып. 2. С. 18–31
- Васильев А. И., Ольшевский Н.А., Коршунов А. П. Банк базовых продуктов межведомственного использования геоинформационный сервис оператора КС ДЗЗ // 14-я Всерос. открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: тез. докл. Москва, 2016. С. 419. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\_conf/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5633.
- 5. Васильев А. И., Стремов А. С., Коваленко В. П. (2017а) Исследование данных комплекса широкозахватной мультиспектральной аппаратуры КА «Ресурс-П» для решения спектрометрических задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 36–51.
- 6. Васильев А. И., Стремов А. С., Михеев А. А. (2017б) Исследование динамики изменения параметров абсолютной калибровки КШМСА КА «Ресурс-П» // 14-я Всерос. открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: тез. докл. Москва, 2017. С. 448. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\_conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6202.
- 7. Лупян Е.А., Саворский В. П. Базовые продукты обработки данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 87–97.
- 8. 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.
- 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. V. 24. No. 6. P. 381–395.
- 10. *Grodecki J.*, *Dial G*. Ikonos Geometric Accuracy // Proc. Joint Workshop of ISPRS Working Groups I/2, I/5 and IV/7 on High Resolution Mapping from Space 2001. University of Hannover, 2001. P. 77–86.
- 11. *Hollingsworth B., Chen L., Reichenbach S. E., Irish R. R.* Automated cloud cover assessment for Landsat TM images // Proc. SPIE. V. 2819: Imaging Spectrometry II. 1996. P. 170–179.
- Kang Y., Pan L., Zhang T., Zhang S., Liu X. Automatic mosaicking of satellite imagery considering the clouds // ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 23<sup>nd</sup> ISPRS Congress. 2016. V. III-3. P. 415–421.
- 13. Leslie C. R., Serbina L. O., Miller H. M. Landsat and agriculture Case studies on the uses and benefits of Landsat imagery in agricultural monitoring and production: Open-File Report 2017–1034 / U.S. Geological Survey. Reston, Virginia: 2017. 34 p. URL: https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20171034.
- 14. *Lowe D. G.* Distinctive image features from scale-invariant keypoints // Intern. J. Computer Vision. 2004. V. 60. No. 2. P. 91–110.
- 15. *Poli D.* A Rigorous Model for Spaceborne Linear Array Sensors // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2007. V. 73. No. 2. P. 187–196.
- 16. *Ramoino F., Tutunaru F., Pera F., Arino O.* Ten-Meter Sentinel-2A Cloud-Free Composite Southern Africa 2016 // Remote Sensing. 2017. V. 9. Iss. 7. P. 652. URL: https://www.mdpi.com/2072-4292/9/7/652.
- 17. *Vasilyev A. I., Boguslavskiy A.A., Sokolov S. M.* Parallel SIFT-detector implementation for images matching // Proc. 21<sup>st</sup> Conf. Computer Graphics and Vision (GraphiCon'2011). Moscow, 2011. P. 173–176.
- 18. *Zhu Z., Woodcock C. E.* Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 118. P. 83–94.

# Standard level processing of Resurs-P KShMSA data for automatic generation of seamless continuous coverage

## A. I. Vasilyev, A. V. Krylov, A. V. Pankin

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

The paper deals with the main algorithms for standard level processing of data from the wide-swath multispectral equipment (KShMSA) on the Resurs-P spacecraft. The algorithms are designed for automatic generation of a seamless continuous coverage (BSP). First, the geometric model of imaging system and its calibration results are given. Second, the relative radiometric correction technique is proposed to monitor the radiometric homogeneity across the entire image area. Third, the specific features of the KShMSA data photogrammetric processing up to the 1D CEOS Level including the geolocation control and adjustment are considered. The technology of automated generation of seamless continuous coverage based on the KShMSA data using the photogrammetric software packages is given with the need for cloudiness masking in automatic generation of BSP being pointed out. The algorithm of cloud pixel classification for the KShMSA data is proposed. Taking the Resurs-P No. 1 and No. 2 ShMSA-VR data (15 strips) on the Samara Region during summer seasons 2015 and 2016 as an example, the Level 0 to Level 1D CEOS processing was done fully automatically including cloud masking, and the BSP was generated automatically (using the Photomod software).

**Keywords:** Earth remote sensing, Resurs-P spacecraft, wide-swath multispectral equipment, standard level processing, seamless continuous coverage, mosaic

Accepted: 19.03.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-18-28

## References

- 1. 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*, 2016, Vol. 15, No. 2, pp. 22–29.
- Blinov V. D., Kvitka V. E., Kompleks KSHMSA. Opisanie algoritmov nazemnoi obrabotki informatsii KSHMSA v izdelii 47KS. Chast' 3. Algoritm № 3 KSH. CTEA 1.701.074 D 4.2 (The complex of wide-swath multispectral equipment. Description of on-ground CSWE information processing algorithms of in the 47KC unit), NPP "OPTJeKS", 2012, 12 p.
- Bocharnikov A. I., Zhilichkin A. G., Kovalenko V. P., Kondratov A. V., Tikhonychev V. V., Khudiakov A. V., Tekhnologii opredeleniya kharakteristik tselevoi apparatury KK DZZ (Techniques for characterization of remote sensing spacecraft targeted equipment), *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2015, Vol. 2, Issue 2, pp. 18–31.
- 4. Vasilyev A. I., Olshevskii N. A., Korshunov A. P., Bank bazovykh produktov mezhvedomstvennogo ispol'zovaniya geoinformatsionnyi servis operatora KS DZZ (Basic product bank of interagency use geinformation service of remote sensing space systems operator), 14-ya Vserossiiskaya otkrytaya konfentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (14th All-Russia Open Conf. "Current Problems of Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow, 2016, p. 419, available at: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33 conf/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5633.
- Vasilyev A. I., Stremov A. S., Kovalenko V. P. (2017a), Issledovanie dannykh kompleksa shirokozakhvatnoi mul'tispektral'noi apparatury KA "Resurs-P" dlya resheniya spektrometricheskikh zadach (Study of Resurs-P wide-swath multispectral equipment data applicability to spectrometric tasks), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 36–51.
- Vasilyev A. I., Stremov A. S., Mikheev A. A. (2017b), Issledovanie dinamiki izmeneniya parametrov absolyutnoi kalibrovki KShMSA KA "Resurs-P" (The study of dynamics change for absolute calibration parameters of KShMSA Resurs-P), 15-ya Vserossiiskaya otkrytaya konfentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (15<sup>th</sup> All-Russia Open Conf. "Current Problems of Remote

Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow, 2017, p. 448, available at: http://smiswww. iki.rssi.ru/d33\_conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6202.

- Loupian E. A., Savorskii V. P., Bazovye produkty obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli (Basic remote sensing data products), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 87–97.
- 8. Markov A. N., Vasilyev A. I., Olshevsky 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.
- 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, pp. 381–395.
- 10. Grodecki J., Dial G., IKONOS Geometric Accuracy, *Proc. Joint Workshop of ISPRS Working Groups I/2*, *I/5 and IV/7 on High Resolution Mapping from Space 2001*, University of Hannover, 2001, pp. 77–86.
- 11. Hollingsworth B., Chen L., Reichenbach S. E., Irish R. R., Automated cloud cover assessment for Landsat TM images, *Proc. SPIE, Vol. 2819: Imaging Spectrometry II*, 1996, pp. 170–179.
- Kang Y., Pan L., Zhang T., Zhang S., Liu X., Automatic mosaicking of satellite imagery considering the clouds, *ISPRS Annals of Photogrammetry*, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 23<sup>rd</sup> ISPRS Congress, 2016, Vol. III-3, pp. 415–421.
- Leslie C. R., Serbina L. O., Miller H. M., Landsat and agriculture Case studies on the uses and benefits of Landsat imagery in agricultural monitoring and production: Open-File Report 2017–1034, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia: 2017, 34 p., available at: https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20171034 (March 12, 2019).
- 14. Lowe D.G., Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *Intern. J. Computer Vision*, 2004, Vol. 60, No. 2, pp. 91–110.
- 15. Poli D., A Rigorous Model for Spaceborne Linear Array Sensors, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007, Vol. 73, No. 2, pp. 187–196.
- 16. Ramoino F., Tutunaru F., Pera F., Arino O., Ten-Meter Sentinel-2A Cloud-Free Composite Southern Africa 2016, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, Issue 7, p. 652, available at: https://www.mdpi. com/2072-4292/9/7/652.
- 17. Vasilyev A. I., Boguslavskiy A. A., Sokolov S. M., Parallel SIFT-detector implementation for images matching, *Proc. 21st Conf. Computer Graphics and Vision (GraphiCon'2011)*, Moscow, 2011, pp. 173–176.
- 18. Zhu Z., Woodcock C. E., Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 118, pp. 83–94.