

Точностные характеристики выходной продукции высокого разрешения КА «Ресурс-П»

Р. Н. Ахметов¹, И. И. Зинина¹, А. А. Юдаков¹, В. В. Еремеев², А. Е. Кузнецов²,
В. И. Пошехонов², О. А. Пресняков², П. Н. Светелкин²

¹ *Ракетно-космический центр «Прогресс», Самара, 443009, Россия*

² *Рязанский государственный радиотехнический университет
Рязань, 390005, Россия
E-mail: foton@rsreu.ru*

Статья посвящена вопросам апостериорной оценки точности выходных информационных продуктов, получаемых в комплексе наземной обработки по данным датчика «Геотон» космических аппаратов серии «Ресурс-П». Приводятся краткие описания алгоритмов обработки изображений по уровням 1А («сшитое» изображение), 2В («сшитое» изображение, ортотрансформированное в картографическую проекцию) и 4В (паншарпенинговый ортоплан). Для снимков этих уровней обработки оценивалась точность геодезической привязки. Дополнительно для продукции уровня обработки 1А оценивалась точность «сшивки», а по паншарпенинговым снимкам — точность совмещения панхроматических и спектрозональных данных. По результатам анализа 90 маршрутов съёмки получены следующие оценки: среднее значение среднеквадратического отклонения (СКО) геопривязки снимков к местности 9,5 м, СКО межматричной сшивки 0,3 пикселя, СКО совмещения спектрозональных изображений не более 0,3 пикселя. Среднее время автоматической обработки маршрута длительно-стью 9 с (8,8 Гбайт) составило: по уровню обработки 2В — 5 мин, по уровню 4В — 8 мин.

Ключевые слова: космические аппараты «Ресурс-П», аппаратура «Геотон», выходные информационные продукты, геопривязка, межматричная и межканальная «сшивка»

Одобрена к печати: 30.04.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-41-47

Введение

В период 2013–2016 гг. Ракетно-космическим центром «Прогресс» (Самара) были созданы три однотипных космических аппарата (КА) «Ресурс-П». На спутниках установлены три типа съёмочной аппаратуры, в том числе камера высокого пространственного разрешения «Геотон», осуществляющая наблюдение земной поверхности в панхроматическом канале с проекцией пикселя 0,8 м и спектрозональных каналах — 2,4 м (Архипов и др., 2014; Ахметов и др., 2010). Для формирования изображений в камере используются три смещённых друг относительно друга на 90 мм оптико-электронных преобразователя (ОЭП), два крайних — спектрозональных, а центральный — панхроматический. Панхроматический ОЭП состоит из 36 матриц приёмников с зарядовой связью, имеющих перекрывающиеся поля зрения, а спектрозональные — из 24. Изображения, формируемые камерой, сопровождаются измерительной информацией от четырёх астродатчиков, датчиков угловых скоростей и приёмника ГЛОНАСС/GPS (Глобальная навигационная спутниковая система / Global Positioning System, система глобального позиционирования).

Наземная обработка информации от всех видов съёмочной аппаратуры спутников выполняется в Научном центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ, Москва) с помощью программного обеспечения, разработанного АО «Ракетно-космический центр «Прогресс» совместно с Рязанским радиотехническим университетом. Основными видами выходной продукции, получаемой с помощью данного программного обеспечения от аппаратуры «Геотон», становятся: непрерывные панхроматические и спектрозональные изображения, синтезированные из видеоданных от отдельных ПЗС-матриц (прибор с зарядовой связью) (выходная продукция уровня обработки 1); изображения уровня обработки 2В, полученные ортотрансформированием «сшитых» снимков уровня обработки 1 в картографические проекции

с использованием цифровых моделей рельефа (ЦМР); ортотрансформированные спектрально-анализные изображения с пространственным разрешением панхроматического снимка (*англ.* pansharpening), полученные комплексированием панхроматических и спектрально-анализных видеоданных уровня обработки 1 (продукты уровня обработки 4В).

Формирование всех видов информационных продуктов основывается на строгих математических моделях геопривязки, устанавливающих соответствие между планарными (m, n) и геодезическими (φ, λ) координатами пикселей изображений земной поверхности с учётом высоты местности h . Процесс получения высокоточных моделей геопривязки видеоданных на основе процедуры геометрической калибровки изложен в статье (Ахметов и др., 2017). Однако вопросы оценки точности выходной продукции, получаемой по этим моделям от всех КА серии «Ресурс-П», рассмотрены не в полном объёме. Поэтому задачи экспериментальных исследований, выполненных в рамках настоящей работы, следующие:

- оценка точности определения координат объектов (ОКО) земной поверхности по изображениям уровней обработки 1А (панхроматический снимок), 2В и 4В;
- определение зависимости точности ОКО от условий съёмки (географические координаты региона, ориентация КА и дата съёмки), т.е. проверка чувствительности модели геопривязки к условиям наблюдения;
- оценка геометрических характеристик выходной продукции, а именно: точности геометрического синтеза непрерывных изображений («сшивки») и совмещения разноканальных видеоданных;
- оценка скорости и надёжности обработки целевой информации при получении выходных информационных продуктов.

Алгоритмы формирования выходной продукции и оценки точности

Как было показано в работе (Ахметов и др., 2017), строгие модели геодезической привязки изображений в общем виде представляются функциями прямого координатного соответствия $\varphi = \Phi_{ij}(m_{ij}, n_{ij}, h, \mathbf{u}_{ij})$, $\lambda = F_{ij}(m_{ij}, n_{ij}, h, \mathbf{u}_{ij})$ и обратного: $m_{ij} = \Phi_{ij}^{-1}(\varphi, \lambda, h, \mathbf{u}_{ij})$, $n_{ij} = F_{ij}^{-1}(\varphi, \lambda, h, \mathbf{u}_{ij})$, где i — номер ПЗС-матрицы; $i = 1, I_j$; j — номер ОЭП, $j = 1, 2, 3$; \mathbf{u}_{ij} — вектор входных параметров, описывающих элементы внешнего и внутреннего ориентирования каждой ПЗС-матрицы. Синтез «сшитых» изображений осуществляется трансформированием видеоданных от каждой ПЗС-матрицы в систему координат изображения от виртуального датчика (m_j, n_j) , $m_j = 1, M_j$, $n_j = 1, N_j$, в соответствии с выражениями (Кузнецов и др., 2015):

$$\left. \begin{aligned} \forall i, \quad b_j(m_j, n_j) &:= \text{Int} [b_{ij}(m_{ij}, n_{ij})], \\ m_j &= \Phi_j^{-1} [\Phi_{ij}(m_{ij}, n_{ij}, h, \mathbf{u}_{ij}), F_{ij}(m_{ij}, n_{ij}, h, \mathbf{u}_{ij}), h, \mathbf{u}_j], \\ n_j &= F_j^{-1} [\Phi_{ij}(m_{ij}, n_{ij}, h, \mathbf{u}_{ij}), F_{ij}(m_{ij}, n_{ij}, h, \mathbf{u}_{ij}), h, \mathbf{u}_j], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $b_j(m_j, n_j)$, $b_{ij}(m_{ij}, n_{ij})$ — яркости пикселей «сшитого» изображения и видеоданных от i -й ПЗС-матрицы; Int — оператор яркостной интерполяции и яркостного совмещения видеоданных; (Φ_j^{-1}, F_j^{-1}) , \mathbf{u}_j — функции обратного координатного соответствия непрерывного изображения от виртуальной ПЗС-матрицы в j -м ОЭП и вектор её входных параметров. Пример синтеза «сшитого» изображения иллюстрирует рисунок (см. с. 43).

Поскольку спектрально-анализные изображения обладают более грубым пространственным разрешением, то все точностные характеристики следует оценивать по данным панхроматического ОЭП ($j = 1$). Оценка точности сшивки выполняется на основе сопоставления координат одноимённых точек, находящихся в перекрывающихся частях изображений от соседних ПЗС-матриц. Для этого на i -м снимке задаются K контрольных точек $(m_{i1}(k), n_{i1}(k))$, $k = 1, K$. С помощью функций прямого и обратного координатного соответствия эти точки пересчитываются в систему координат $(i + 1)$ -го изображения $(m_{i+1,1}(k), n_{i+1,1}(k))$. Затем с использованием

механизма субпиксельного корреляционно-экстремального поиска контрольные точки i -го изображения отождествляются на $(i + 1)$ -м снимке. Обозначим отождествлённые точки индексами $(\tilde{m}_{i+1,1}(k), \tilde{n}_{i+1,1}(k))$, тогда среднеквадратическая ошибка сшивки непрерывного изображения $\sigma_{\text{сш}}$ оценивается по формуле:

$$\sigma_{\text{сш}} = \left\{ \frac{1}{(I-1)K} \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{k=1}^K \left[(m_{i+1,1}(k) - \tilde{m}_{i+1,1}(k))^2 + (n_{i+1,1}(k) - \tilde{n}_{i+1,1}(k))^2 \right] \right\}^{1/2}. \quad (2)$$



Непрерывное изображение (справа), синтезированное по видеоданным от двух ПЗС-матриц (слева)

Оценка точности ОКО по непрерывному изображению уровня обработки 1А осуществляется с использованием строгой модели съёмки и опорным точкам местности с известными координатами $\varphi(q), \lambda(q), h(q), q = \overline{1, Q}$. Для этого изображение каждой опорной точки идентифицируется на сшитом изображении $b_1(m_1, n_1)$ и фиксируются её планарные координаты $m_1(q), n_1(q)$. Планарные координаты точек пересчитываются в геодезические:

$$\tilde{\varphi}(q) = \Phi_1(m_1(q), n_1(q), h(q), \mathbf{u}_1), \quad \tilde{\lambda}(q) = F_1(m_1(q), n_1(q), h(q), \mathbf{u}_1), \quad (3)$$

где Φ_1 и F_1 — функции геопривязки «сшитого» изображения.

Точность ОКО конкретного снимка $\sigma_{\text{ОКО}}$ оценивается выражением:

$$\sigma_{\text{ОКО}} = \left\{ \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q e^2(q) \right\}^{1/2}, \quad (4)$$

$$e(q) = 2R \cdot \arcsin \left[\sin^2 \left(\frac{\varphi(q) - \tilde{\varphi}(q)}{2} \right) + \cos \varphi(q) \cdot \cos \tilde{\varphi}(q) \cdot \sin^2 \left(\frac{\lambda(q) - \tilde{\lambda}(q)}{2} \right) \right]^{1/2},$$

где R — радиус Земли.

Получение выходного продукта уровня обработки 2В осуществляется ортотрансформированием с использованием ЦМР «сшитого» изображения в картографическую проекцию UTM:

$$\left. \begin{aligned} b_1(x, y) &:= \text{Int} [b_1(m_1, n_1)], \quad x = \Psi_x [\Phi_1(m_1, n_1, h, \mathbf{u}_1), F_1(m_1, n_1, h, \mathbf{u}_1)], \\ y &= \Psi_y [\Phi_1(m_1, n_1, h, \mathbf{u}_1), F_1(m_1, n_1, h, \mathbf{u}_1)], \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где x, y — картографические координаты пикселя; Ψ_x, Ψ_y — уравнения картографического проектирования.

Точность ОКО на ортотрансформированном изображении $\sigma_{\text{ОКО}}^*$ также оценивается по опорным точкам, координаты которых предварительно пересчитываются из геодезических в метрические (картографические):

$$\sigma_{\text{ОКО}}^* = \left\{ \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q \left[(x(q) - \tilde{x}(q))^2 + (y(q) - \tilde{y}(q))^2 \right] \right\}^{1/2}, \quad Q \geq 10, \quad (6)$$

где $x(q)$, $y(q)$, $\tilde{x}(q)$, $\tilde{y}(q)$ — исходные и отождествлённые на ортоплане координаты опорной точки.

Геометрическое совмещение «сшитых» разновременных спектрозональных изображений между собой сводится к их трансформированию в систему координат панхроматического снимка $b_1(m_1, n_1)$. Особенность этой операции состоит в том, что из-за ошибок определения элементов внешнего ориентирования, описываемых векторами \mathbf{u}_j , геометрическое совмещение снимков с субпиксельной точностью не может быть выполнено. Для устранения этого недостатка применяется процедура относительного геодезического ориентирования «сшитых» изображений, суть которой состоит в следующем. С использованием механизма корреляционно-экстремального отождествления находятся K одноимённых точек на трёх изображениях с координатами $(m_j(k), n_j(k))$, $k = \overline{1, K}$, $j = \overline{1, 3}$. На основе уравнений прямого координатного соответствия для контрольных точек панхроматического изображения $m_1(k)$, $n_1(k)$ определяются их геодезические координаты $\varphi(k)$, $\lambda(k)$. Затем уточняются угловые элементы внешнего ориентирования таким образом, чтобы рассогласование между идентифицированными и рассчитанными по уравнениям координатами контрольных точек было минимальным:

$$\sum_{j=2,3} \sum_{k=1}^K \left\{ \left[m_j(k) - \Phi_j^{-1}(\varphi(k), \lambda(k), h(k), \mathbf{u}_j + \Delta \mathbf{u}) \right]^2 + \left[n_j(k) - F_j^{-1}(\varphi(k), \lambda(k), h(k), \mathbf{u}_j + \Delta \mathbf{u}) \right]^2 \right\} \rightarrow \min_{\Delta \mathbf{u}}, \quad (7)$$

где $\Delta \mathbf{u}$ — вектор поправочных значений к угловым элементам внешнего ориентирования.

Суммарное значение остаточных рассогласований, найденных по формуле (7), после осреднения на величину $2K$ будет характеризовать ошибку совмещения спектрозональных и панхроматических видеоданных $\sigma_{\text{СВМ}}$. Собственно синтез паншарпингового изображения осуществляется в ходе ортотрансформирования изображений $b_j(m_j, n_j)$, $j = \overline{1, 3}$, в картографическую проекцию и формирования спектрозональных компонент в соответствии с алгоритмом, изложенным в работе (Kuznetsov, Svetelkin, 2015). При этом цветосинтезированное RGB-изображение высокого пространственного разрешения не будет иметь ложных цветовых контуров, если $\sigma_{\text{СВМ}} \leq 0,3$ пикселя спектрозонального изображения или $\sigma_{\text{СВМ}} \leq 72$ м, что практически соответствует проекции пикселя панхроматического изображения.

Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились в Научном центре оперативного мониторинга Земли. Для анализа были предоставлены 90 маршрутов объектовой съёмки датчиком «Геотон» с космических аппаратов «Ресурс-П» № 2 и 3 из архива Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» за 2015–2017 гг. со следующими характеристиками:

- наличие данных от трёх ОЭП и измерений как минимум от трёх астродатчиков;
- облачность не более 30 %;
- угол крена до 45° (при объектовой съёмке углы крена и тангажа КА близки к нулю);
- наличие изображений крупных городов и объектов, пригодных для оценки точности геопривязки;

- наличие разносезонных снимков и снимков с изображением водной поверхности и снежного покрова.

Контроль точности ОКО выполнялся по данным сервиса Google, который предоставляет высокоточные ортопланы крупных городов. Для определения высот местности h использовалась ЦМР SRTM с разрешением 3 угл. с. Обработка выполнялась на сервере со следующими характеристиками: оперативная память — 512 Гбайт, число процессорных ядер — 16, тип процессора — Intel Xeon Gold 6144 3,5 ГГц.

В ходе автоматической обработки маршрутов съёмки по уровню 1А в программном комплексе выполнялись следующие технологические операции: загрузка панхроматических и спектрональных изображений с жёсткого диска в оперативную память сервера, радиометрическая коррекция видеоданных, относительное геодезическое ориентирование, сшивка панхроматических изображений, автоматическая оценка точности сшивки, сохранение результатов обработки на жёстком диске. Каждый выходной информационный продукт контролировался визуально оператором комплекса обработки. В *таблице* представлены результаты оценки точности ОКО по 21 маршруту из 90.

Значения точности ОКО по изображениям уровня обработки 1А, полученным от КА «Ресурс-П» № 2 и 3

Номер маршрута	Местность	Дата съёмки	Угол крена, град	Длительность съёмки, с	$\sigma_{\text{ОКО}}$, м
0042_0102_02088_1_02082_05	Словения, Любляна	11.05.2015	1	9	7,32
0042_0102_02088_1_02083_01	Великобритания, Глазго	11.05.2015	2	5	6,84
0042_0102_02088_1_02083_03	Испания, Ла-Корунья	11.05.2015	15	8,75	9,47
0042_0102_02088_1_02085_04	США, Колумбус	11.05.2015	-16	5	14,38
0042_0102_02088_1_02087_01	США, Рапид-Сити	11.05.2015	5	4,75	8,60
0042_0102_02088_1_02087_03	США, Сан-Антонио	11.05.2015	-1	5	11,41
0043_0306_03077_1_03076_02	Португалия, Лиссабон	03.09.2016	23	7	8,50
0043_0306_02663_1_02662_06	Испания, Барселона	03.09.2016	-1	7	15,97
0043_0102_02684_1_02682_02	США, Туксон	04.09.2016	-5	8	4,64
0043_0102_03219_1_03215_01	Уругвай, Монтевидео	14.09.2016	-9	7	6,19
0043_0306_03903_1_03898_03	РФ, Иркутск	23.10.2016	0	21,75	10,38
0043_0102_03449_1_03443_04	Испания, Барселона	24.10.2016	20	7	9,79
0043_0102_03847_1_03841_03	Испания, Барселона	19.11.2016	16	7	9,58
0043_0102_04198_1_04192_02	РФ, Москва	12.12.2016	24	33,25	10,23
0043_0102_04214_1_04207_02	РФ, Москва	13.12.2016	-25	33,875	7,64
0043_0102_04437_1_04434_02	РФ, Иркутск	28.12.2016	10	29	4,98
0043_0102_04673_1_04668_01	Испания, Мадрид	12.01.2017	0	10	3,98
0043_0102_04994_1_04985_03	РФ, Иркутск	02.02.2017	-14	29,25	8,26
0043_0102_05050_1_05049_03	РФ, Москва	06.02.2017	-31	8,5	8,66
0043_0102_05087_1_05080_02	РФ, Москва	08.02.2017	27	29,5	6,78
0043_0306_02882_1_02881_01	США, Денвер	17.09.2017	19	9	8,48

По результатам осреднения были получены следующие значения точности ОКО:

- для маршрутов с углами крена $\leq 10^\circ$: $\sigma_{\text{ОКО}} = 8,35$ м;
- среднее значение по всем маршрутам: $\sigma_{\text{ОКО}} = 9,94$ м.

Среднее значение СКО межматричной сшивки: $\sigma_{\text{сш}} = 0,3$ пикселя.

В соответствии с международным критерием SE90 ошибки геопривязки панхроматических изображений уровня обработки 1А с вероятностью 90 % не превосходят значений: 12,5 м для маршрутов с углами крена $\leq 10^\circ$ и 16,4 м для маршрутов, снятых с углами крена более 10° .

Аналогичные оценки точности ОКО получены и по выходным продуктам уровней обработки 2В и 4В для маршрутов съёмки с углами крена менее 10° . Для маршрутов с углами крена больше 10° ошибка геопривязки увеличивается на 0,5 м, что объясняется ошибками задания высоты в ЦМР.

При формировании выходных продуктов уровня обработки 4В была выполнена оценка точности совмещения спектральных каналов. В результате установлено, что снимки равнинных территорий совмещены с СКО $\approx 0,3$ пикселя спектрального изображения. Однако по результатам визуального анализа маршрутов горных районов выявлены локальные участки с координатным рассогласованием на уровне 1 пикселя (маршрут 0043_0303_04986_1_04985_05). Исследования показали, что подобное рассогласование вызвано недостаточной точностью свободно распространяемых ЦМР, что делает актуальными работы по созданию систем дистанционного зондирования Земли, ориентированных на получение высокоточных планово-высотных основ.

При получении выходных продуктов уровней обработки 2В и 4В были оценены временные затраты с учётом времени сохранения изображения на диск. Так, среднее время обработки маршрута длительностью 9 с и объёмом 8,8 Гбайт составило:

- по уровню обработки 2В — 5 мин;
- по уровню обработки 4В — 8 мин.

Выводы

По результатам проведённых экспериментальных исследований установлено следующее:

- основные геометрические характеристики выходной продукции, получаемой с использованием штатно функционирующего программного обеспечения, по точности геопривязки, сшивки и совмещения спектральных данных соответствуют тактико-техническим требованиям на космическую систему «Ресурс-П»;
- используемые в программном обеспечении модели геопривязки нечувствительны к условиям наблюдения КА земной поверхности. При этом точность определения координат объектов зависит лишь от точности определения элементов внешнего ориентирования камеры измерительными системами спутника и используемой при геокодировании цифровой модели рельефа;
- обработка исходных маршрутов съёмки по заданным уровням выполняется в автоматическом режиме, обеспечивая 100%-ю вероятность получения выходной продукции с заданными характеристиками. Время обработки маршрутов длительностью до 7 с (размер одного условного кадра) позволит выполнить требования по оперативности для перспективных КА типа «Ресурс-П» № 4–5 и «Ресурс-ПМ».

Авторы благодарят сотрудников НЦ ОМЗ за активное участие в проведённых исследованиях.

Литература

1. *Архипов С. А., Бакланов А. И., Герасименко В. В.* Многоспектральная оптико-электронная аппаратура «Геотон» космического аппарата «Ресурс-П» // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 2. С. 44–54.
2. *Ахметов Р. Н., Бакланов А. И., Кирилин А. Н., Стратилатов Н. Р., Федоров В. М., Новиков М. В.* Космический аппарат «Ресурс-П» // Геоматика. 2010. № 4(9). С. 23–26.
3. *Ахметов Р. Н., Еремеев В. В., Кузнецов А. Е., Мятлов Г. Н., Пошехонов В. И., Стратилатов Н. Р.* Высокоточная геодезическая привязка изображений земной поверхности от КА «Ресурс-П» // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 1. С. 44–53.

4. Кузнецов А. Е., Пресняков О. А., Мятлов Г. Н. Структурное восстановление изображений от многоматричных сканерных датчиков дистанционного зондирования Земли // Цифровая обработка сигналов. 2015. № 3. С. 29–36.
5. Kuznetsov A., Svetelkin P. Integration of multispectral images from modern Earth remote sensing systems // 5th Intern. Workshop on Computer Science and Engineering (WCSE 2015-IPCE). Moscow, Russia, 2015. P. 20–25.

Precision characteristics of high resolution output products from Resurs-P spacecraft

R. N. Akhmetov¹, I. I. Zinina¹, A. A. Yudakov, V. V. Ereemeev², A. E. Kuznetsov²,
V. I. Poshekhonov², O. A. Presnyakov², P. N. Svetelkin²

¹ Space Rocket Centre “Progress”, Samara 443009, Russia

² Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan 390005, Russia
E-mail: foton@rsreu.ru

The paper is devoted to the issues of a posteriori estimation of the accuracy of the output information products obtained by the integrated data processing unit on the basis of Geoton sensor data of the Resurs-P spacecraft series. Brief descriptions of image processing algorithms at level 1A (stitched image), 2B (stitched image, orthorectified into a cartographic projection) and 4B (pan-sharpening orthoplan) are provided. To assess the level of processing, the accuracy of the geodetic reference is evaluated. Additionally, for products of 1A processing level, the accuracy of stitching is evaluated and the accuracy of combining panchromatic and spectrozonal data is estimated from pan-sharpening images. From the analysis of 90 imaging routes, the following estimates were obtained: the average RMSE of geo-referencing images to a terrain of 9.5 m, the RMSE of intermatrix stitching of 0.3 pixels, the RMSE of combining spectrozonal images of not more than 0.3 pixels. The average time for automatic processing of a route with a duration of 9 s (8.8 GB) was 5 min. for the 2B processing level, and 8 min. for the 4B processing level.

Keywords: Resurs-P spacecraft, Geoton equipment, output information products, georeferencing, intermatrix and interchannel stitching

Accepted: 30.04.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-41-47

References

1. Arkhipov S. A., Baklanov A. I., Gerasimenko V. V., *Mnogospektral'naya optiko-elektronnaya apparatura "Geoton" kosmicheskogo apparata "Resurs-P"* (Multispectral optical-electronic equipment Geoton of the spacecraft Resource-P), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 2, pp. 44–54.
2. Akhmetov R. N., Baklanov A. I., Kirilin A. N., Stratilatov N. R., Fedorov V. M., Novikov M. V., *Kosmicheskii apparat "Resurs-P"* (Spacecraft Resurs-P), *Geomatika*, No. 4(9), 2010, pp. 23–26.
3. Akhmetov R. N., Ereemeev V. V., Kuznetsov A. E., Myatov G. N., Poshekhonov V. I., Stratilatov N. R., *Vysokotochnaya geodezicheskaya privyazka izobrazhenii zemnoi poverkhnosti ot KA "Resurs-P"* (High-precision geodetic reference of images of the Earth's surface from the spacecraft Resurs-P), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 1, pp. 44–53.
4. Kuznetsov A. E., Presnyakov O. A., Myatov G. N., *Strukturnoe vosstanovlenie izobrazhenii ot mnogomatrixnykh skanernykh datchikov distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Structural restoration of images from multi-matrix scanners of Earth remote sensing sensors), *Tsifrovaya obrabotka signalov*, 2015, No. 3, pp. 29–36.
5. Kuznetsov A., Svetelkin P., *Integration of multispectral images from modern Earth remote sensing systems*, *5th Intern. Workshop on Computer Science and Engineering (WCSE 2015-IPCE)*, Moscow, Russia, 2015, pp. 20–25.