

Особенности обработки данных сенсора «Геотон-Л1» космического аппарата «Ресурс-П» при формировании бесшовных сплошных покрытий регионов РФ

А. Н. Марков, *nova@ntsomz.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. И. Васильев, *к.ф.-м.н.*, *nova@ntsomz.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. В. Крылов, *nova@ntsomz.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

М. А. Евлашкин, *nova@ntsomz.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Пестряков, *nova@ntsomz.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Михеев, *nova@ntsomz.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. С. Алексеевский, *nova@ntsomz.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматриваются особенности обработки данных сверхвысокого разрешения аппаратуры «Геотон-Л1» космического аппарата «Ресурс-П» в обеспечение формирования бесшовных сплошных покрытий (БСП) на регионы Российской Федерации. Приведены методика формирования БСП и требования к опорной информации. Обозначены проблемные вопросы отбора данных и создания продуктов стандартной обработки данных «Геотон-Л1». Приведена технология формирования бесшовных сплошных покрытий, обеспечивающая точность геодезической привязки на опорных точках не хуже 5 м. На примере обработки данных Белгородской области (более 27 тыс. км²) дано распределение временных затрат по технологическим процессам: 2/3 всего времени занимает обработка данных с участием оператора, при этом 1/2 всего времени — стандартная обработка. В рамках выполнения работ по заказу ГК «Роскосмос» с использованием рассматриваемой технологии сформированы БСП за летние периоды 2013–2018 гг. на 10 регионов РФ: Москва и Московская область, Санкт-Петербург и Ленинградская область, Севастополь и Республика Крым, Белгородская, Брянская, Воронежская, Калининградская, Курская, Самарская, Орловская области.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космический аппарат «Ресурс-П», сверхвысокое разрешение, бесшовное сплошное покрытие, мозаика, банк базовых продуктов

Generation of Seamless Continuous Coverages of the Russian Regions Using Resurs-P Very-High Resolution Data

A. N. Markov, *nova@ntsomz.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. I. Vasilyev, *Cand. Sci. (Phys.-Math.)*, *nova@ntsomz.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. V. Krylov, *nova@ntsomz.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

M. A. Evlashkin, *nova@ntsomz.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. A. Pestryakov, *nova@ntsomz.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. A. Mikheev, *nova@ntsomz.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. S. Alexeevskiy, *nova@ntsomz.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The article discusses the ultra-high resolution data processing of the Geoton-L1 equipment installed on the Resurs-P spacecraft to ensure the generation of seamless continuous coverage (SCC) for regions of Russia. The method for achieving SCC and the requirements for supporting information are given. The problematic issues of data selection and the creation of standard data processing Geoton-L1 products are indicated. The technology of achieving seamless continuous coverage, which ensures the accuracy of geodetic reference at ground control points of no worse than 5 m is described. Taking the processing of the Belgorod Region data (more than 27,000 square kilometers) as an example, the time distribution by technological processes is presented: 2/3 of total time is data processing with the operator involvement and 1/2 of total time is standard level processing. As part of the efforts undertaken at the request of the Roscosmos State Corporation for Space Activities, using the above technology, the SCCs were generated for 10 regions of the Russian Federation during summer seasons of 2013–2018: Moscow and Moscow Region, Saint Petersburg and Leningrad Region, Sevastopol and the Republic of Crimea, Belgorod Region, Bryansk Region, Voronezh Region, Kaliningrad Region, Kursk Region, Samara Region, and Orel Region.

Keywords: Earth remote sensing, Resurs-P spacecraft, very-high resolution, seamless continuous coverage, mosaic, basic product bank

Введение

Основные тенденции развития мировой группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли высокого (1–10 м) и сверхвысокого (лучше 1 м) пространственного разрешения [1–3] предусматривают: 1) улучшение пространственного разрешения (до 0,1–0,3 м) для новых спутников; 2) повышение частоты съемки за счет создания многочисленных группировок малых спутников. Кроме того, наметился устойчивый тренд оперативного предоставления космической информации и информационных продуктов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на основе веб-сервисов (например, <https://eos.com/landviewer>). При этом существенное увеличение объемов космической информации ДЗЗ высокого разрешения определило еще один тренд — регламентированное формирование и обновление мозаик или бесшовных сплошных покрытий для отдельных регионов и всего мира (например, <https://www.planet.com>).

Отечественная группировка в период 2013–2018 гг. насчитывала до трех действующих космических аппаратов (КА) ДЗЗ типа «Ресурс-П», оборудованных сенсором «Геотон-Л1» сверхвысокого разрешения [4]. На начало 2020 г. по целевому назначению функционировал только один КА ДЗЗ типа «Ресурс-П». Вместе с тем востребованность в данных и информационных продуктах ДЗЗ неуклонно возрастает. Более того, немалый интерес проявляют потребители к бесшовным сплошным покрытиям больших территорий на основе данных ДЗЗ, технологии формирования которых созданы АО «Российские космические системы» в рамках выполнения опытно-конструкторских работ Федеральной космической программы России на 2016–2025 гг. Примеры применения этих технологий для автоматического формирования бесшовных сплошных покрытий (БСП) на основе данных среднего разрешения КА «Ресурс-П» и «Метеор-М» рассмотрены в работах [5, 6]. Предоставление информационных продуктов и БСП потребителям осуществляется оператором КС ДЗЗ с использованием геоинформационных сервисов «Банк базовых продуктов» (<https://bbp.ntsomz.ru>) [7, 8] и «Геопортал Роскосмоса» (<https://gptl.ru>) [9, 10]. В рамках

данной статьи рассматриваются особенности обработки данных сверхвысокого разрешения аппаратуры «Геотон-Л1» космического аппарата «Ресурс-П» при формировании бесшовных сплошных покрытий на регионы Российской Федерации.

Методика формирования бесшовного сплошного покрытия

Общая методика формирования бесшовного сплошного покрытия на основе набора сцен данных аппаратуры «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» включает следующие основные этапы.

1. Стандартная обработка набора сцен до уровня 4А в соответствии с утвержденным Госкорпорацией «Роскосмос» «Перечнем стандартных продуктов, изготавливаемых по материалам ДЗЗ с КА типа «Ресурс-П» и поставляемых потребителям [11]:

- геометрическая и радиометрическая коррекции;
- трансформирование на плоскость;
- расчет параметров RPC;
- синтез спектральных RGB-каналов и паншарпенинг на основе данных панхроматического спектрального канала.

2. Фотограмметрическая обработка набора сцен:

- поиск и задание связующих и опорных точек;
- блочное уравнивание набора сцен на основе множества связующих и опорных точек;
- ортотрансформирование набора сцен.

3. Построение БСП:

- построение и редактирование линий порезов;
- расчет параметров яркостного выравнивания;
- формирование единого результирующего изображения БСП.

Определим требования к условиям съемки и опорной информации в обеспечение формирования БСП. Во-первых, с учетом пространственного разрешения (0,7 м) аппаратуры «Геотон-Л1» КА «Ресурс-П» необходимая точность планового положения опорных точек должна составлять не менее половины пикселя — 0,35 м. Во-вторых, на рис. 1

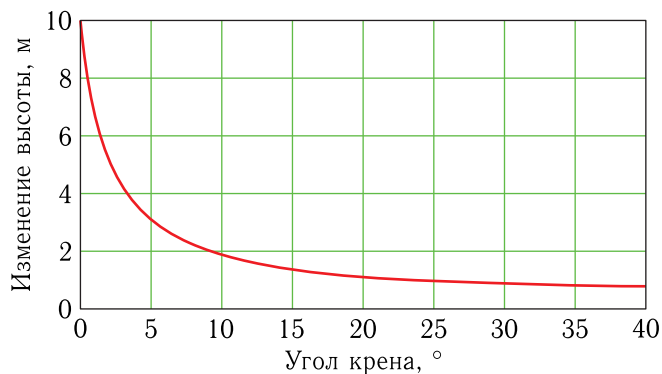


Рис. 1. Зависимость точности задания высоты наблюдаемой точки местности на снимке «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» от угла крена КА, обеспечивающая смещение образа точки на снимке в пределах 0,5 пикселя

приведена зависимость ошибки задания геодезической высоты наблюдаемой точки местности от углов крена съемочной аппаратуры «Геотон-Л1» КА «Ресурс-П», при которых наблюдается смеще-

ние образа точки местности на снимке в пределах половины пикселя. Соответственно для «надирного» снимка точность задания высоты должна быть лучше 10 м, при углах крена менее 30° — не хуже 1 м. Таким образом, для формирования БСП с точностью (среднеквадратическим отклонением (СКО)) до 3–4 м необходимо использовать: 1) снимки с углами визирования/крена не более 10° ; 2) опорные точки с точностью 0,35 м в плане и по высоте не хуже 2 м; 3) цифровую модель рельефа (ЦМР) с максимальной ошибкой не более 12 м (3 СКО).

Далее следует отметить проблему выбора исходных данных аппаратуры «Геотон-Л1» КА «Ресурс-П», связанную с отсутствием планового сплошного покрытия территории РФ. На рис. 2 приведено покрытие Ленинградской области маршрутами (сценами) съемки за летние периоды 2013–2018 гг. с уровнем облачности менее 50 %.

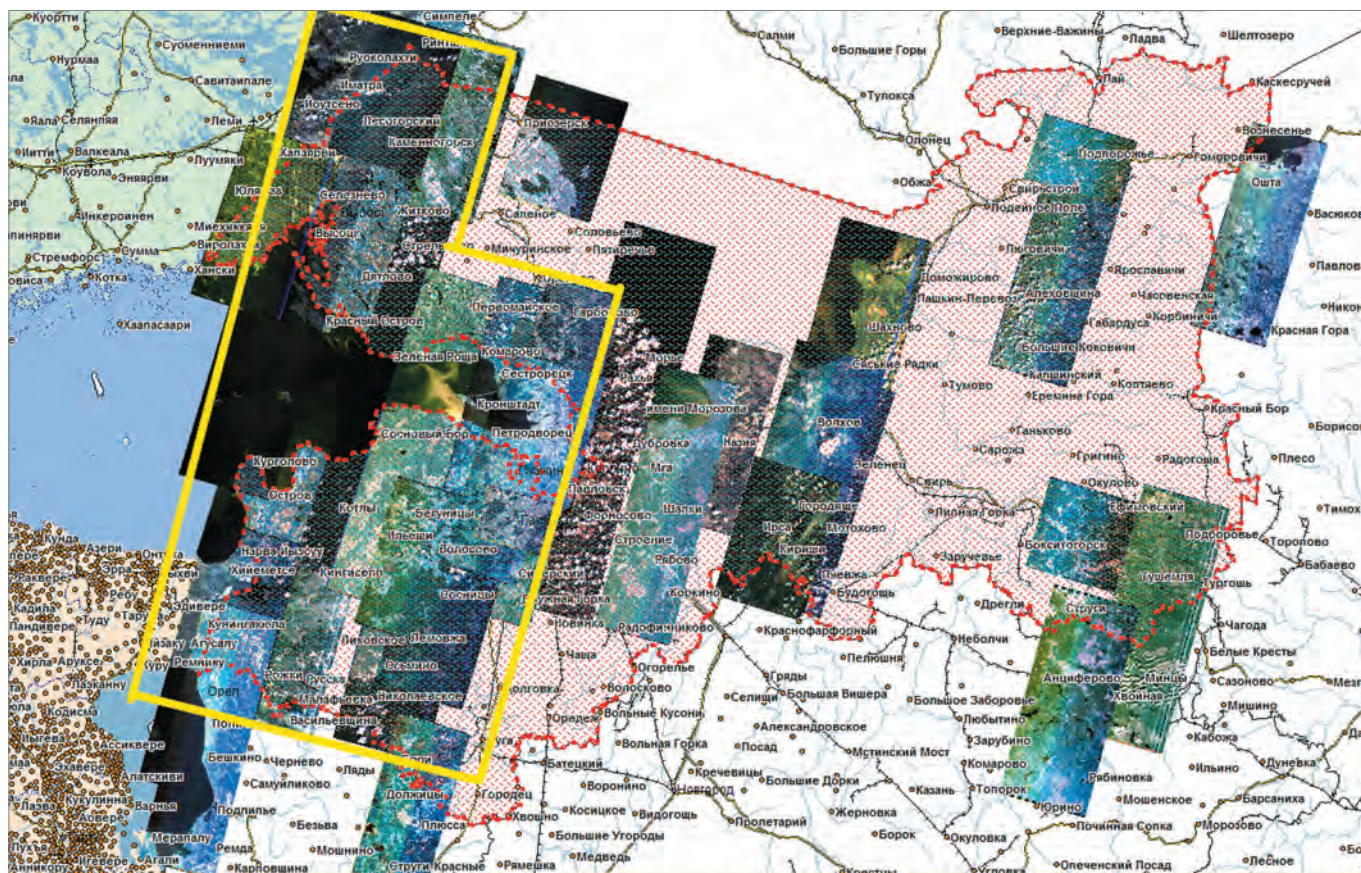


Рис. 2. Набор маршрутов/сцен съемки аппаратуры «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» территории Ленинградской области за летние периоды 2013–2018 гг.

Фактически отснято 2/3 региона, однако ввиду отсутствия перекрытия между сценами (с уровнем облачности менее 30 %) представляется возможным формирование сплошного покрытия только для 1/3 региона (граница обозначена желтым цветом на рис. 2). Для увеличения площади бесшовного покрытия необходимо использовать сцены, отснятые в условиях визирования более 20–30° по крену и/или с уровнем облачности 50–100 %, что не всегда целесообразно, поскольку от этого зависит качество результирующего изображения.

Проблемные вопросы стандартной обработки данных «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» в обеспечение формирования БСП

На рис. 3 представлена схема расположения ПЗС-матриц в фокальной плоскости сенсора «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П». Как видно из схемы, спектральные каналы Red (0,61–0,68 мкм), Green (0,52–0,60 мкм) находятся в рамках одной группы ПЗС-матриц, канал Blue (0,45–0,52 мкм) — в рамках другой группы ПЗС-матриц. Каждая из этих групп равноудалена от группы ПЗС-матриц панхроматического канала (0,58–0,80 мкм), находящейся в плоскости оптического центра.

Приведенная оптическая схема расположения различных групп ПЗС-матриц обуславливает про-

блему RGB-синтеза спектральных каналов, а именно одновременную съемку одной и той же точки местности разными группами ПЗС-матриц. Как следствие, попиксельное сведение спектральных каналов возможно за счет использования высоты наблюдаемой точки местности (на рис. 4 приведена траектория $a_1-P_1-b_1$). При этом ошибки задания высоты наблюдаемой точки местности приводят к ошибкам синтеза спектральных каналов (на рис. 4 приведена траектория $a_1-P_2-b_2$). На рис. 5 приведен фрагмент изображения, на котором демонстрируются ошибки синтеза спектральных каналов, связанных с неточностью задания высоты наблюдаемого высотного объекта.

Решение проблем синтеза спектральных каналов возможно в случае реализации следующих конструктивных и технологических задач.

1. Применение светоразделительных оптических систем, обеспечивающих одномоментную съемку в различных спектральных каналах (данный прием реализован для аппаратуры ГСА КА «Ресурс-П»).

2. Минимизация расстояния между группами ПЗС-матриц таким образом, чтобы временной интервал задержки наблюдения одной и той же точки местности был согласован с пространственным разрешением аппаратуры (данное решение реализовано для спектральных каналов Red и Green в рамках одной группы ПЗС-матриц аппаратуры «Геотон-Л1»).

3. Согласование пространственного разрешения аппаратуры с цифровой моделью рельефа

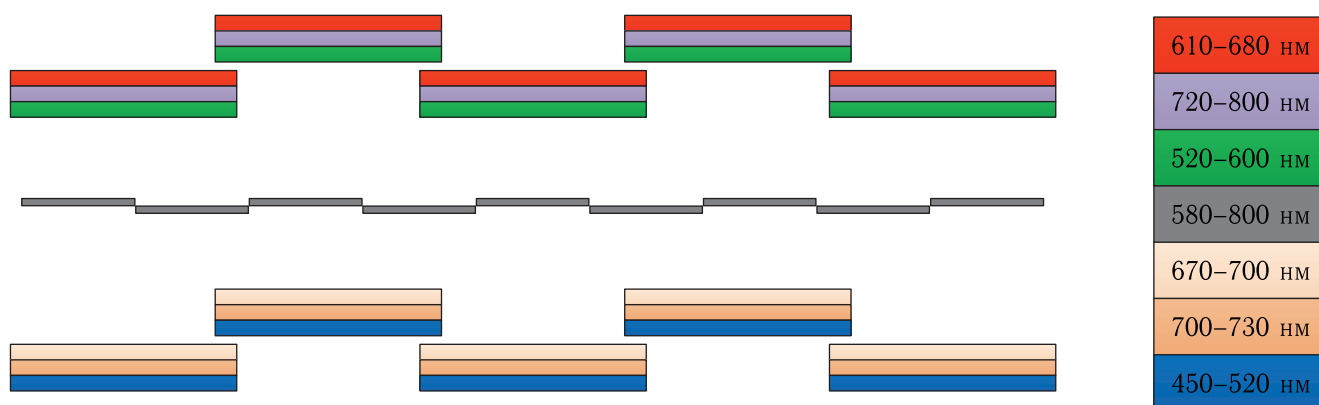


Рис. 3. Схема расположения ПЗС-матриц в фокальной плоскости сенсора «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П». Справа приведены параметры светофильтров ПЗС

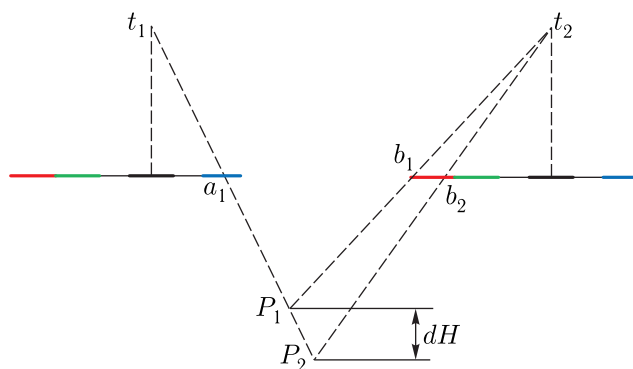


Рис. 4. Схема синтеза спектральных каналов при ошибках задания высоты наблюдаемого объекта

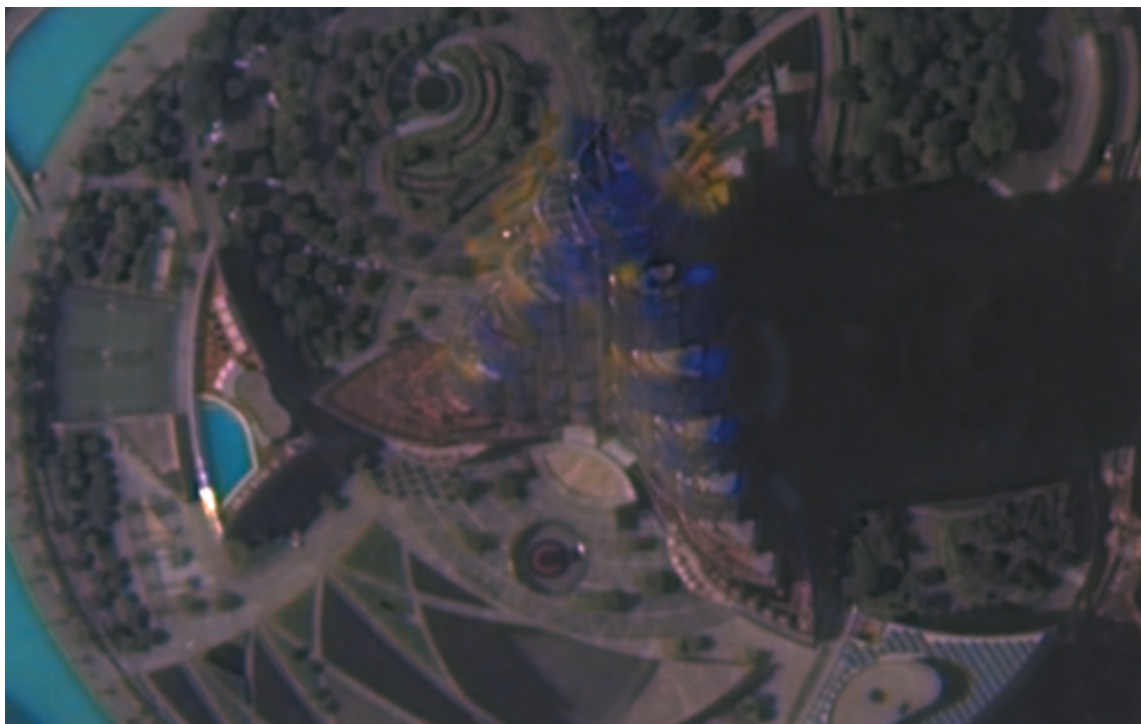


Рис. 5. Ошибки синтеза спектральных каналов данных «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» для высотных объектов

(ЦМР), используемой при синтезе спектральных каналов (данное требование характерно для аппаратуры среднего пространственного разрешения КА «Ресурс-П» — КШМСА [9]).

4. Синтез изображений различных спектральных каналов на основе нелинейных деформаций изображений (данное решение реализовано в НКПОР КА «Ресурс-П» в виде специального программного обеспечения, требующего участия оператора для контроля триангуляционной сети, см. рис. 6).

Технология формирования БСП

Общая технология формирования БСП, по данным «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П», приведена на рис. 7. Технология включает этап формирования продуктов стандартной обработки, ориентированный на программные решения НКПОР, в рамках которых выполняется создание продуктов уровня 4А по «Перечню стандартных продуктов, изготавливаемых по материалам ДЗЗ с КА типа «Ресурс-П» [11] в автоматизированном режиме (с участием

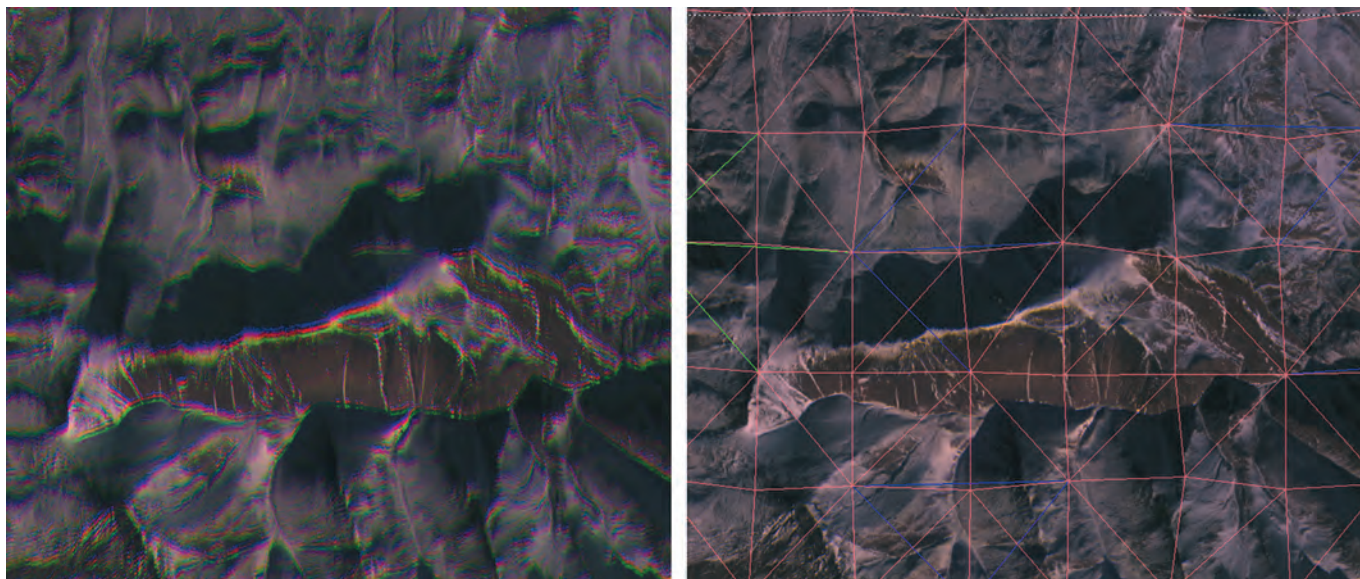


Рис. 6. Пример синтеза спектральных каналов данных «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» с использованием корреляционного сопоставления и построения триангуляционной сети

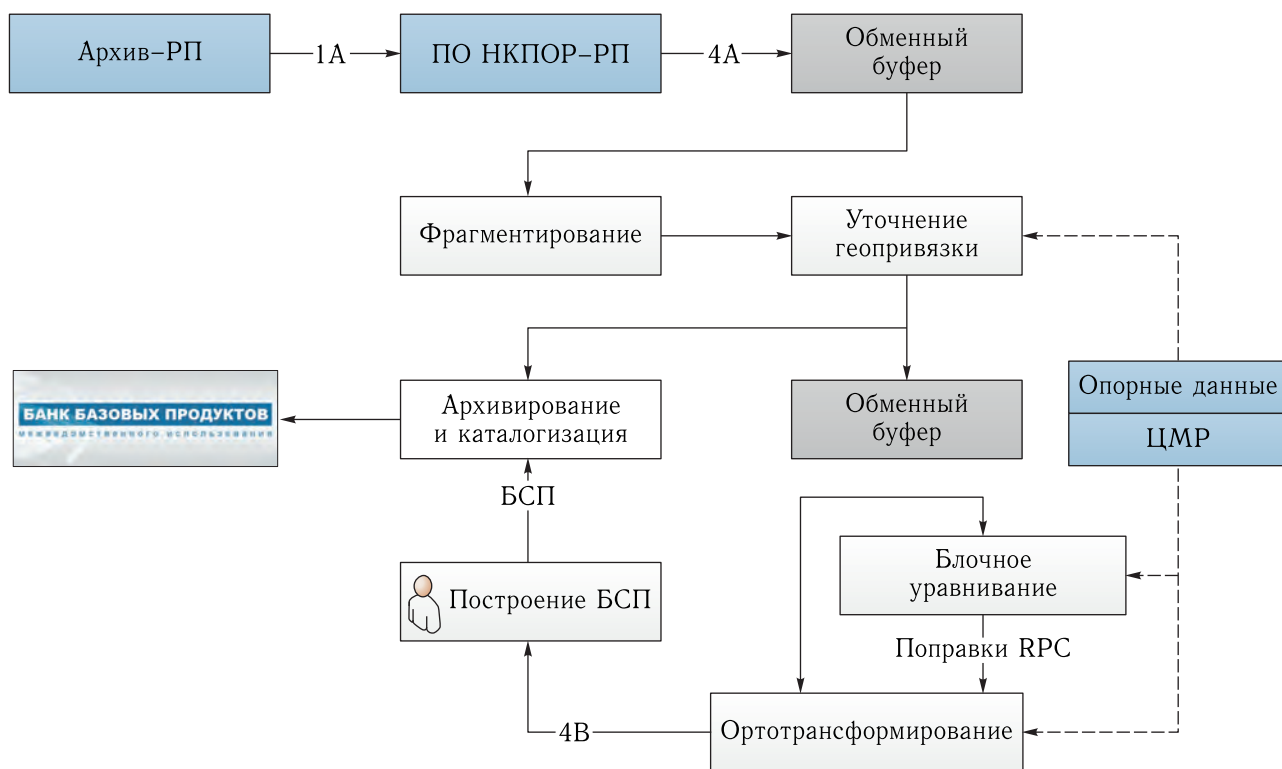


Рис. 7. Технология формирования БСП по данным аппаратуры «Геотон-Л1» КА типа «Ресурс-П»

оператора). Далее для каждого маршрута выполняется автоматическое уточнение геопривязки (на основе опорных данных и цифровой модели рельефа),

а также фрагментирование (см. рис. 8) маршрута на сцены. Обработанные маршруты/сцены аккумулируются в обменном буфере, а также загружаются

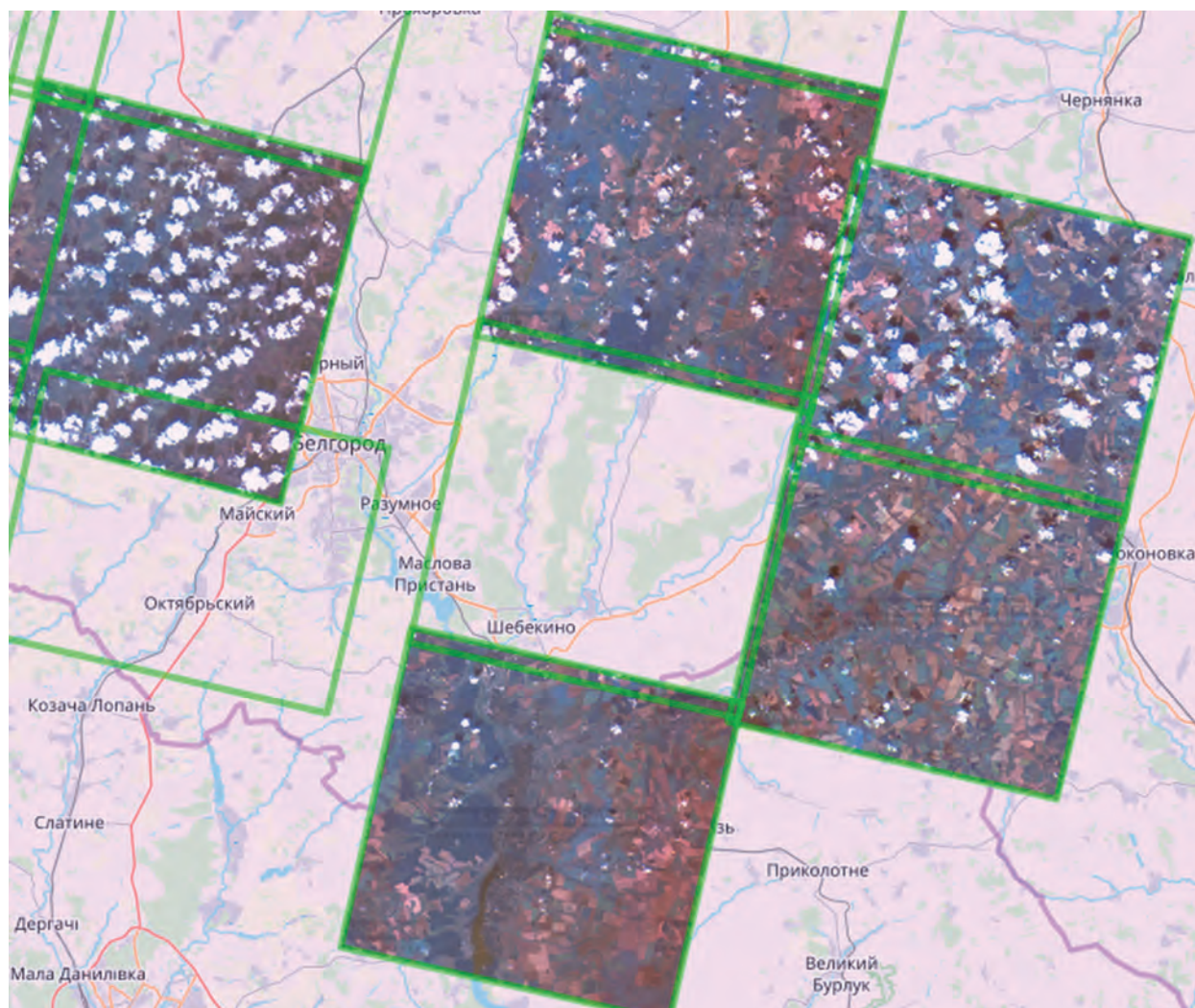


Рис. 8. Примеры фрагментированных маршрутов аппаратуры «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» на территорию Белгородской области

в геоинформационный сервис «Банк базовых продуктов», где производится их каталогизация и архивирование.

В рамках данной работы для автоматического измерения плановых координат опорных точек использовалось покрытие, предоставляемое Planet Labs (пространственное разрешение — 3 м), точность геодезической привязки которого не хуже 10 м [12]. Доступ к этому покрытию реализован в рамках библиотеки GDAL (<https://gdal.org>). В качестве ЦМР применялась SRTM (<https://doi.org/10.5066/F7PR7TFT>).

Далее выполнялось блочное уравнивание для заданного набора маршрутов/сцен и последующее

их ортотрансформирование. Например, при блочном уравнивании данных «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» на территорию Республики Крым (перепад высот более 1500 м) СКО на опорных точках составило не более 5 м [13]. При этом для регионов с перепадом высот в несколько сотен метров, например Белгородской области, СКО привязки отдельных сцен составляло около 1,5 пикселей опоры или не более 5 м (см. рис. 9). Соответственно для таких «равнинных» регионов формирование БСП осуществлялось без блочного уравнивания и для сведения контуров ортотрансформированных маршрутов/сцен, при необходимости применялись методы локальной деформации, в частности

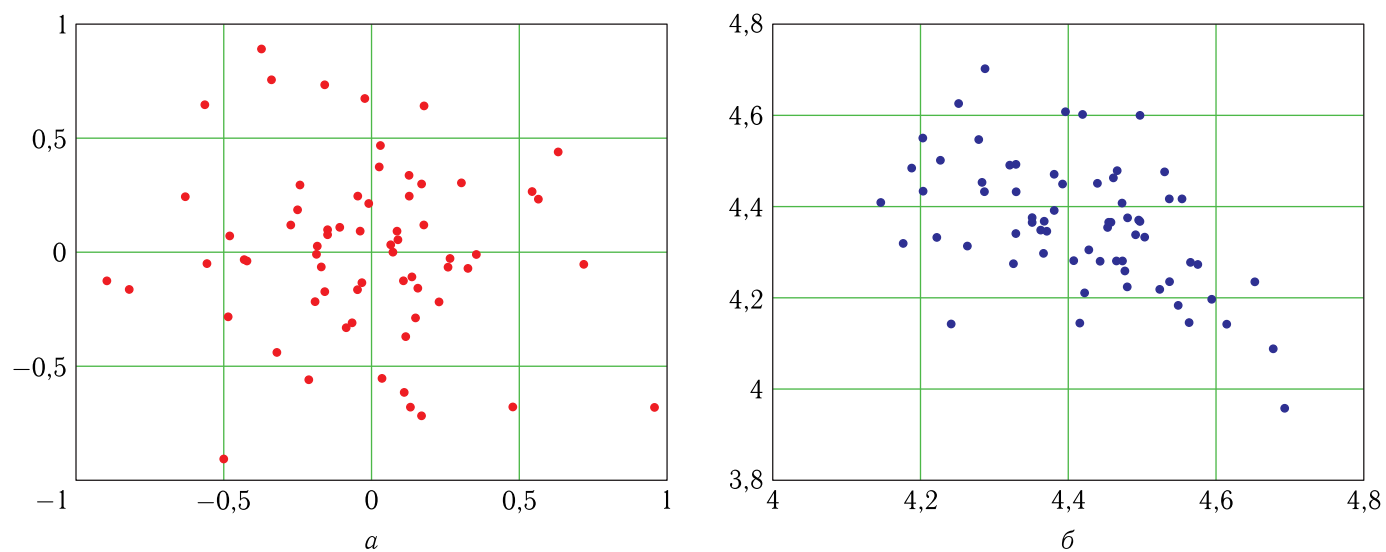


Рис. 9. Распределение *а)* систематических и *б)* случайных ошибок (м) геопривязки сцен «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П», используемых при формировании БСП на территорию Белгородской области

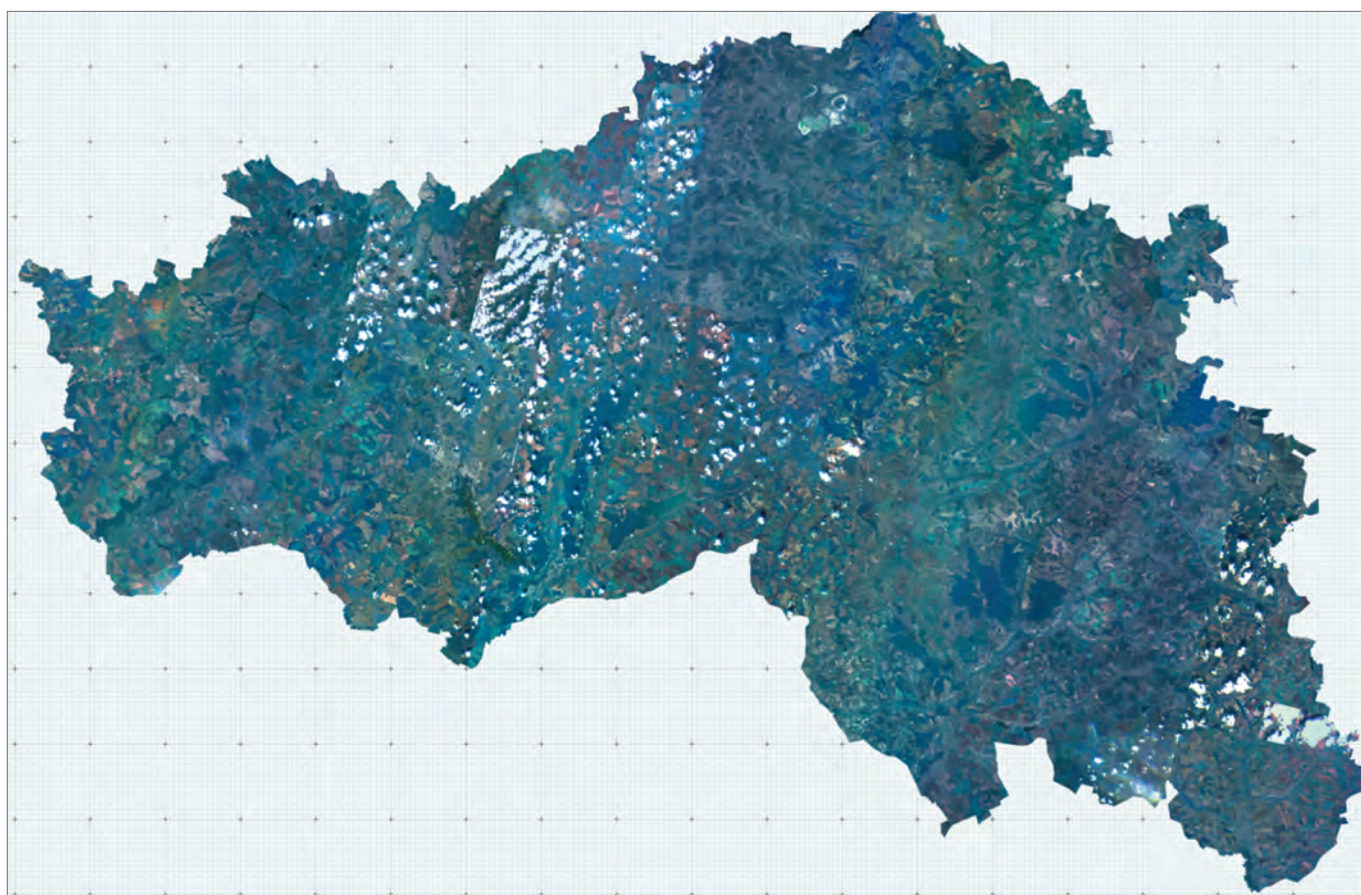


Рис. 10. Пример БСП территории Белгородской области, сформированного по данным аппаратуры «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» за летние периоды 2013–2018 гг.

Т а б л и ц а. Временные оценки формирования БСП Белгородской области

Технологический этап	Время, ч	Объем, ТБ
Стандартная обработка	250*	1,2**
Фрагментирование	37	2,5
Уточнение привязки	46	–
Ортотрансформирование	31	2,5
Редактирование порезов	61*	–
Формирование результирующего изображения	39	0,5

* — этап с участием оператора. ** — данные со сжатием.

реализованные в фотограмметрическом пакете Photomod. Результирующее изображение БСП Белгородской области приведено на рис. 10.

В таблице показаны временные оценки технологических этапов формирования покрытия (включая накладные расходы, связанные с копированием данных) на примере формирования БСП Белгородской области на основе обработки более 30 маршрутов данных «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П». Соответствующая таблице диаграмма распределения временных затрат показана на рис. 11. Анализ диаграммы показывает, что работа оператора составляет 2/3 всего времени формирования конечного продукта, при этом более половины времени уходит на стандартную обработку данных «Геотон-Л1» КА «Ресурс-П».



Рис. 11. Диаграмма распределения времени между технологическими этапами формирования БСП Белгородской области

Следует отметить, что этапы автоматической обработки данных выполнялись на двух вычислительных узлах, организованных в соответствии с моделью линейного конвейера. Узел фрагментирования в том числе являлся буфером стандартных продуктов НКПОР. Для уточнения геопривязки и ортотрансформирования применялся вычислительный узел, обеспечивающий также копирование ортотрансформированных сцен на вычислительный узел оператора формирования БСП. С учетом межсетевого взаимодействия, а также накладных расходов одновременного чтения/записи обменных буферов обеспечивались номинальные показатели автоматической обработки данных — 15–25 Мб/с. Для увеличения скорости автоматической обработки планируется дальнейшая оптимизация технологической схемы.

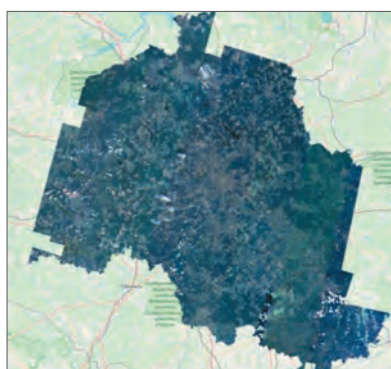
Заключение

В рамках выполнения контрактных работ по заказу Госкорпорации «Роскосмос» сформированы бесшовные сплошные покрытия по данным аппаратуры «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» за летние периоды 2013–2018 гг. на следующие регионы РФ (см. рис. 10, 12): Москва и Московская область, Санкт-Петербург и Ленинградская область, Севастополь и Республика Крым, Белгородская, Брянская, Воронежская, Калининградская, Курская, Самарская, Орловская области.

В общей сложности на основе данных стандартных продуктов ДЗЗ объемом около 10 ТБ (с учетом сжатия) сформировано более 330 тыс. км² (более 3,5 ТБ) бесшовных сплошных покрытий регионов Российской Федерации сверхвысокого пространственного разрешения.

Список литературы

1. Кучейко А.А. Мировые тенденции развития отрасли ДЗЗ из космоса. Отрасль ДЗЗ в вопросах и ответах // Земля из космоса, 2019, № 10 (26). С. 36–45.
2. Бакланов А.И. Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения Земли



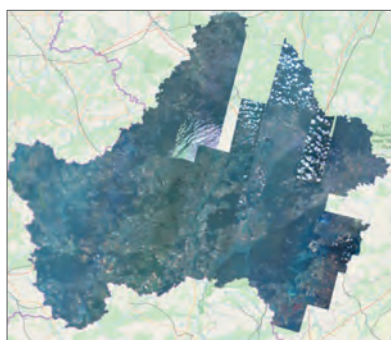
Москва
и Московская область



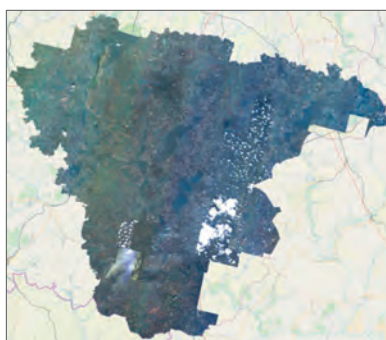
Санкт-Петербург
и Ленинградская область



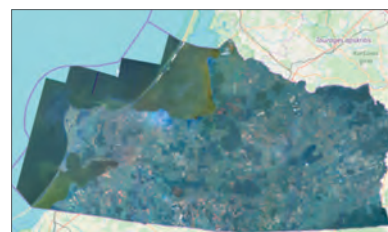
Севастополь
и Республика Крым



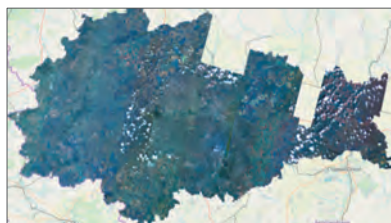
Брянская область



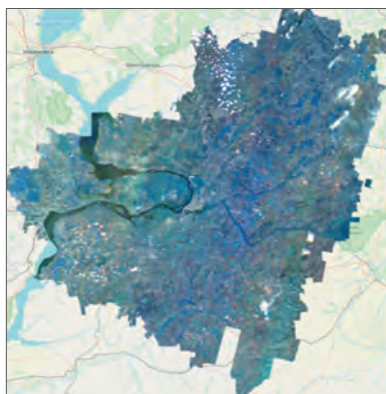
Воронежская область



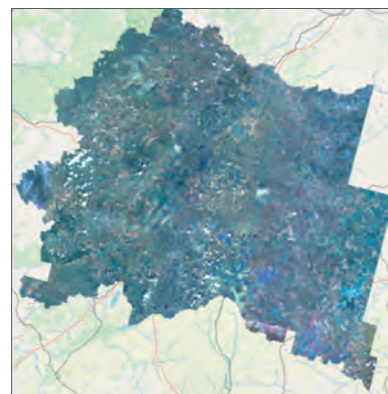
Калининградская область



Курская область



Самарская область



Орловская область

Рис. 12. Обзорные изображения бесшовных сплошных покрытий регионов РФ, сформированных по данным аппаратуры «Геотон-Л1» КА серии «Ресурс-П» за летние периоды 2013–2018 гг.

3. Бакланов А.И. Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения Земли высокого разрешения (ч. II) // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, вып. 4. С. 14–27.
4. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Стратилатов Н.Р., Бакланов А.И., Федоров В.М., Новиков М.В. Космический аппарат «Ресурс-П» // Геоматика, 2010, № 4 (9). С. 23–26.
5. Васильев А.И., Крылов А.В., Панкин А.В. Стандартная обработка данных КШМСА КА «Ресурс-П» в обеспечение автоматического формирования бесшовного сплошного покрытия // Современные про-

- блемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019, т. 16, № 2. С. 18–28.
6. Марков А.Н., Васильев А.И., Крылов А.В., Евлашкин М.А., Михеев А.А. Эксперимент по формированию бесшовного сплошного покрытия на территорию российской федерации по данным КМСС КА «Метеор-М» // Дистанционное зондирование Земли из космоса в России, 2019, вып. № 1. С. 50–55.
 7. Марков А.Н., Васильев А.И., Ольшевский Н.А., Михаленков Р.А., Салимонов Б.Б., Синяев П.А., Евлашкин М.А. Особенности доступа к ресурсам геоинформационного сервиса «Банк базовых продуктов» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019, т. 16, № 3. С. 228–237.
 8. Селин В.А., Марков А.Н., Васильев А.И., Коршунов А.П. Геоинформационный сервис «Банк базовых продуктов» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2019, т. 6, вып. 1. С. 40–48.
 9. Тохиян О.О., Кошкин К.В. Опыт разработки и эксплуатации геопортала Роскосмоса // Геоматика, 2011, № 2. С. 20–28.
 10. Тохиян О.О., Гладков А.П., Васильев А.Ю. Расширение возможностей сервисов геопортала Роскосмоса // Геоматика, 2015, № 2. С. 22–25.
 11. Перечень стандартных продуктов, изготавливаемых по материалам ДЗЗ с КА типа «Ресурс-П». Продукты стандартной обработки информации, полученной аппаратурой «Геотон» КА «Ресурс-П». http://www.ntsomz.ru/for_clients/standart_ip/standart_ip_resurs_p#geoton (Дата обращения 12.02.2020).
 12. Planet imagery product specifications, JANUARY 2018. https://www.planet.com/products/satellite-imagery/files/Planet_Combined_Imagery_Product_Specs_December2017.pdf (Дата обращения 12.02.2020).
 13. Алексеевский А.С., Пешкун А.А. Пилотный проект бесшовное сплошное покрытие высокого разрешения (БСПВР) Республики Крым // Вебинар Госкорпорации «Роскосмос» с представителями органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации 15 февраля 2018 года. <http://www.ntsomz.ru/webinar150218> (Дата обращения 12.02.2020).