

Технология создания бесшовного сплошного покрытия территории России по данным космических аппаратов «Канопус-В»

А. Н. Марков, А. И. Васильев, А. В. Крылов, А. А. Михеев, А. А. Пестряков,
С. В. Ромайкин, Р. А. Михаленков, И. Д. Мурашова, А. А. Акимов

*Научный центр оперативного мониторинга Земли, Москва, 127490, Россия
E-mail: nova@ntsomz.ru*

В составе отечественной орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) эксплуатируются космические аппараты (КА) высокого разрешения типа «Канопус-В» (до шести действующих КА). Данные КА обеспечивают регламентированную съёмку территории России для решения различных прикладных, научных и народно-хозяйственных задач. В рамках настоящей статьи рассматривается технология создания бесшовного сплошного покрытия всей территории страны на основе данных КА «Канопус-В», отснятых преимущественно за период 2018–2022 гг. Для этого, во-первых, выполнен анализ архивов Оператора российских космических систем ДЗЗ в обеспечение построения накладки сплошного покрытия территории РФ съёмкой с минимальным уровнем облачности. Во-вторых, проведена стандартная обработка данных и формирование буфера ортопродуктов данных КА «Канопус-В». В-третьих, выполнено фрагментирование территории России на основе регулярной сетки с ячейками размером $5 \times 5^\circ$. Для каждой ячейки сетки отобраны ортопродукты и сформировано бесшовное сплошное покрытие с использованием фотограмметрического пакета в интерактивном режиме. В-четвёртых, на основе сформированных покрытий создана результирующая мозаика с учётом яркостного выравнивания. Наконец, отдельно рассматриваются особенности автоматического и интерактивного контроля качества обработки данных в ходе формирования сплошного покрытия фрагментов. Учитывая, что суммарное время создания мозаики на основе сформированных ортопродуктов заняло около года, отмечается распределение времени обработки между различными технологическими процессами в рамках задействованных вычислительных ресурсов. В заключении намечается дальнейшее развитие технологии — формирование регламентированных ежегодных покрытий и повышение степени автоматизации в части их создания.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космический аппарат, «Канопус-В», высокое пространственное разрешение, обработка данных, фотограмметрия, бесшовное сплошное покрытие, мозаика, территория РФ

Одобрена к печати: 19.09.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-97-115

Введение

Анализ номенклатуры информационных продуктов и сервисов, формируемых и предоставляемых в рамках различных национальных космических программ в сфере дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), например, Бразилии (<https://data.inpe.br/big/web/>), Индии (<https://www.nrsc.gov.in/>), Евросоюза (<https://www.copernicus.eu/>), позволяет выделить вид продуктов — регламентированно формируемые мозаичные покрытия территории государства. При этом данные продукты создаются на основе данных ДЗЗ как среднего, так и высокого пространственного разрешения. Например, для территории Бразилии применяются данные WFI CBERS 4A (*англ.* Wide Field Imager camera, China Brazil Earth Resources Satellite 4A) (<https://data.inpe.br/stac/browser/collections/mosaic-cbers4-brazil-3m-1>), для Индии — данные AWiFS (*англ.* Advanced Wide Field Sensor) Resourcesat (Aparna, 2022), для Евросоюза — данные MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel (Wiatr, 2020), а также данные КА Pleiades, SPOT, Dove и др. (<https://www.eea.europa.eu/en/resolveuid/b1af40d19bfb-47928989b678ad8e2332/datahubitem-view/0ab52ae4-eeb5-47b8-9ac3-ad518cbef455?activeAccordion=1092905>). Более того, для отдельных зарубежных космических систем (КС) ДЗЗ,

в частности космических аппаратов (КА) Landsat и Sentinel, объём отснятых данных позволяет регламентированно формировать мозаичные покрытия глобального уровня (Kirches et al., 2019; Zhang, 2023). При этом операторы КС ДЗЗ высокого пространственного разрешения предоставляют доступ к формируемым покрытиям глобального уровня на коммерческой основе (https://docs.mapflow.ai/_downloads/4e911965d61ceaf8db0d4a56f18d81d2/imagery-base-maps.pdf, <https://developers.planet.com/docs/basemaps/>), тем самым подтверждая востребованность данного вида продукта.

Применительно к данным российской группировки КА ДЗЗ в (Марков и др., 2020а) выполнен анализ архивов Оператора российских КС ДЗЗ с целью формирования покрытий различного уровня: глобального, федерального и регионального. Отмечается возможность построения регламентированных глобальных покрытий на основе данных низкого разрешения МСУ-МР (многозональное сканирующее устройство малого разрешения) КА «Метеор-М», например, на основе подхода (Васильев и др., 2022а). Для данных среднего разрешения КМСС (комплекс многозональной спутниковой съёмки) КА «Метеор-М» демонстрируются мозаики территории РФ, созданные по данным двухнедельной съёмки. При этом в публикации (Прошин и др., 2021) рассматривается технология (Прошин и др., 2020) построения композитных мозаичных покрытий среднего разрешения федерального уровня по данным пятидневной съёмки КМСС КА «Метеор-М». В работе (Плотников и др., 2020) приводится описание серии покрытий территории РФ, Восточной Европы, Средней Азии и других регионов, сформированных по данным КМСС КА «Метеор-М» для количественной оценки характеристик земной поверхности. В свою очередь, в публикации (Васильев и др., 2022б) показана возможность формирования глобальной мозаики на основе данных КМСС КА «Метеор-М», съёмка которых была выполнена за пятилетний период. Кроме того, в статье (Васильев и др., 2019) рассматривается задача построения на основе данных КШМСА (комплекс широкозахватной мультиспектральной аппаратуры) КА «Ресурс-П» покрытий среднего разрешения, сопоставимого с пространственным разрешением (*англ.* Ground Sample Distance — GSD) данных КА Landsat, равным 15 м. Показано, что возможно создавать подобные покрытия только регионального уровня и с использованием данных, отснятых за не менее чем двухлетний период. В соответствии с исследованием (Марков и др., 2020а) подобная ситуация наблюдается и для данных высокого разрешения. В частности, анализ архивов Оператора КС ДЗЗ (съёмка 2013–2019 гг.) показывает возможность создания мозаичных покрытий КА «Канопус-В» и «Ресурс-П» только регионального уровня и на основе данных съёмки, выполненной за трёхлетний и пятилетний период соответственно. В статьях (Марков и др., 2020б; Федоткин и др., 2024) приводятся примеры сформированных (в автоматизированном и автоматическом режимах соответственно) бесшовных сплошных покрытий (БСП) высокого разрешения для различных регионов РФ.

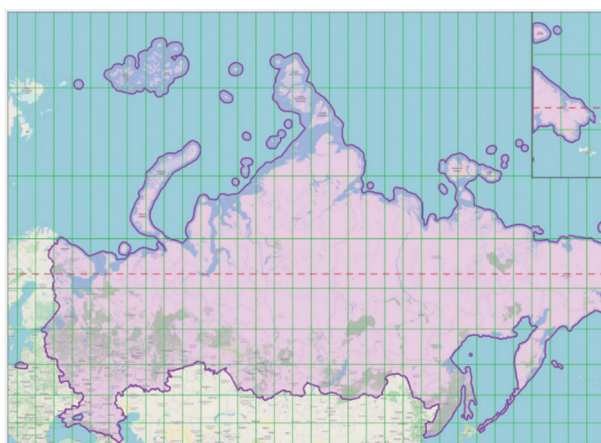
Учитывая современные тенденции по существенному расширению отечественной группировки КА ДЗЗ высокого разрешения (включая федеральную целевую программу «Сфера»), в том числе направленного на регламентированную ежедневную съёмку всей территории РФ, в настоящей статье рассматривается задача разработки технологии формирования безоблачного БСП высокого разрешения федерального уровня на основе данных КА «Канопус-В». Далее в статье приводится результат дополнительного анализа архивов Оператора в части оценки временного интервала данных съёмки в обеспечении сплошного покрытия территории РФ. Рассматриваются технологические особенности стандартной обработки отобранных маршрутов съёмки в рамках геоинформационного сервиса Оператора — «Банк базовых продуктов» (ББП) (Селин и др., 2019). Демонстрируется технологическая схема формирования покрытия федерального уровня на основе предварительно фрагментированной территории РФ с использованием регулярной сетки. Рассматриваются особенности верификации исходных данных и формируемых покрытий ячеек сетки. Приводятся оценки затраченного времени на обработку и проверку качества данных с использованием задействованных вычислительных ресурсов. В заключении демонстрируется сформированное результирующее покрытие, включая распределение данных по годам съёмки и номерам КА.

Анализ данных архива Оператора в обеспечение формирования набора данных бесшовных сплошных покрытий территории РФ

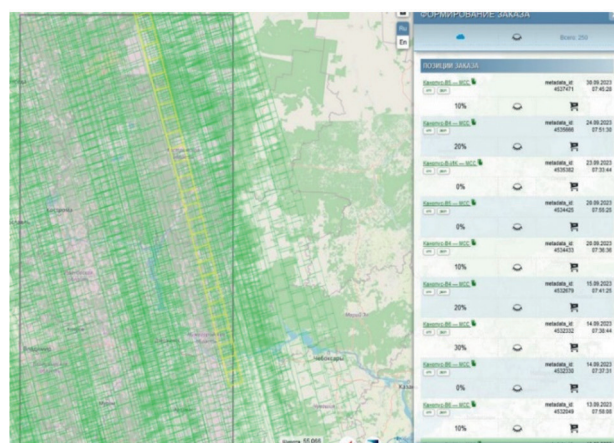
Орбитальная группировка КА «Канопус-В» была полностью развёрнута к 2019 г., при этом с 2020 г. и до настоящего времени (2024) группировка включает КА «Канопус-В» № 3–6 и «Канопус-В-ИК» (КА «Канопус-В» № 1 был выведен из состава группировки ввиду завершения срока эксплуатации). Основные характеристики целевой аппаратуры — панхроматической съёмочной системы (ПСС) и мультиспектральной съёмочной системы (МСС) — приведены в *табл. 1*.

Таблица 1. Основные характеристики целевой аппаратуры КА типа «Канопус-В» (Горбунов, Слободской, 2010)

Параметр	ПСС	МСС
Полоса обзора, км	400	400
Полоса захвата, км	23	20
Пространственное разрешение, м	2,1	10,5
Спектральные каналы, нм	460–850	460–520, 520–600, 630–690, 750–860



а



б

Рис. 1. Схема фрагментирования области интереса территории РФ на основе сетки для подбора снимков КА «Канопус-В» каждой ячейки по данным архива Оператора: а — фрагментирование на основе сетки с ячейками размером $5 \times 5^\circ$ (пунктирная линия — северный полярный круг); б — специализированный веб-интерфейс поиска и отбора данных каталога ЕТРИС Д33 для ячеек сетки

Учитывая, что технологический контур стандартной обработки Оператора КС Д33 предусматривает ведение архива преимущественно данных КА «Канопус-В» уровня обработки L0/L1B (данные не приведены к картографической проекции, не ортотрансформированы), то визуальный анализ и отбор снимков, пригодных для формирования покрытия территории РФ, проводился на основе их обзорных изображений каталога Единой территориально-распределённой информационной системы дистанционного зондирования Земли (ЕТРИС Д33). С целью подбора подходящих снимков было выполнено фрагментирование территории РФ — разбиение всей области интереса на равные фрагменты $5 \times 5^\circ$ (рис. 1а). Далее для каждого фрагмента осуществлялся отбор отснятых данных архива Оператора на заданный временной интервал с целью обеспечения безоблачного покрытия. При этом для отбора данных был разработан специализированный графический веб-интерфейс (на основе программного интерфейса ЕТРИС, <https://s3.gptl.ru/geoportat-public/pro-guide/v1/index.html>), демонстрирующийся на рис. 1б и обеспечивающий задание: 1) более одного временного

интервала поиска; 2) количества отображаемых маршрутов съёмки в результатах постраничного поиска.

Таким образом было отобрано более 30 000 маршрутов съёмки для формирования покрытия территории РФ, отснятых за 2018–2022 гг. и обеспечивающих покрытие более 95 % территории РФ. На *рис. 2, 3* демонстрируется распределение (в %) данных, используемых для формирования покрытия, а также распределение маршрутов съёмки в зависимости от КА.

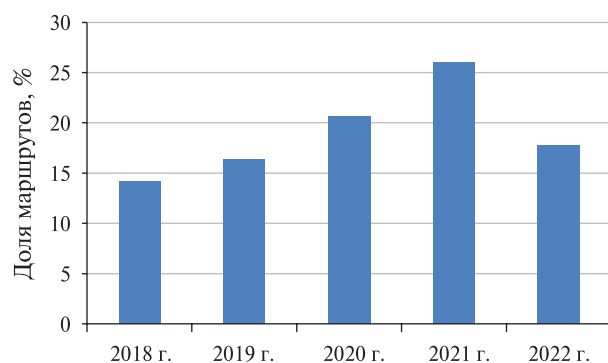


Рис. 2. Распределение отобранных маршрутов по годам съёмки данных КА «Канопус-В», используемых для формирования покрытия территории РФ

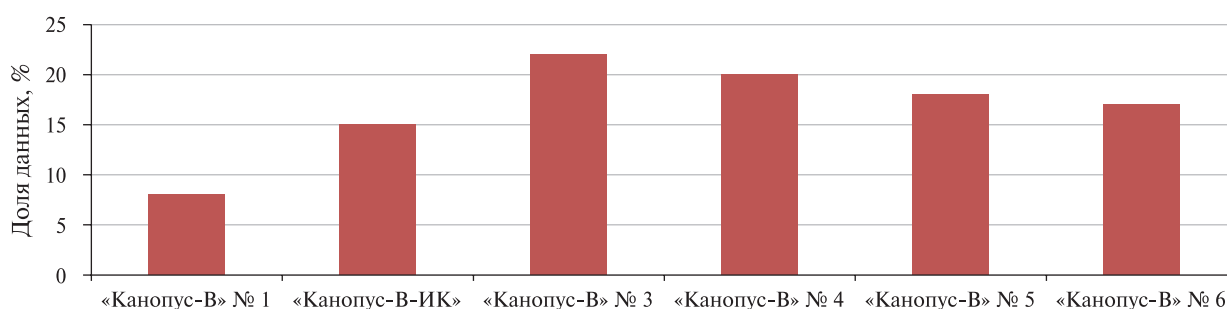


Рис. 3. Распределение данных по КА «Канопус-В» из состава группировки, используемых для формирования покрытия территории РФ

Стандартная обработка отобранных данных архива Оператора для формирования бесшовных сплошных покрытий территории РФ

В рамках штатного технологического контура стандартной обработки Оператора обеспечивается ведение долговременного архива L0-данных КА «Канопус-В», реализованного с использованием ленточного хранилища на базе IBM Tivoli Storage Manager. Характерной особенностью ленточного хранилища является низкая скорость случайного чтения, обусловленная необходимостью перемонтирования картриджей (на которых записаны маршруты съёмки). Например, выгрузка L0-данных КА «Канопус-В», отобранных за пятилетний период (для ячейки 5×5°), приводит к скорости доступа не более 5–10 МБ/с. Оптимизация данного процесса достигается либо предварительным кэшированием, либо ранжированием отобранных маршрутов съёмки и последовательной выгрузкой данных с картриджей. В таком случае средняя скорость выгрузки L0-данных возрастает на порядок. Суммарно выгрузка данных съёмки КА «Канопус-В» заняла менее двух месяцев.

Для выгружаемых маршрутов применялась конвейерная технология автоматической стандартной обработки данных (Васильев и др., 2020), включающая отдельные этапы: 1) распаковка L0-данных; 2) корреляционный поиск опорных точек и уточнение параметров кинематической модели движения КА; 3) устранение радиометрической неоднородности; 4) фрагментирование маршрута съёмки на отдельные сцены и формирование ортопродук-

тов отдельных сцен; 5) формирование пакета метаданных сцены. На *рис. 4* приведена общая технологическая схема автоматической стандартной обработки данных КА «Канопус-В», для которой следует отметить применимость высокопроизводительных серверов гетерогенной архитектуры, задействующих процессор GPU (*англ.* Graphics Processing Unit) преимущественно для автоматического поиска опорных точек. При этом на основе двух серверов (конфигурация — AMD EPYC 75f3, 2.95 GHz, 32Cores, RAM 1TB, 4xNvidia V100) удавалось обрабатывать в среднем не более 80 маршрутов съёмки в сутки. Суммарное процессорное время, затраченное на стандартную обработку отобранных L0-данных, составило не более полугода.

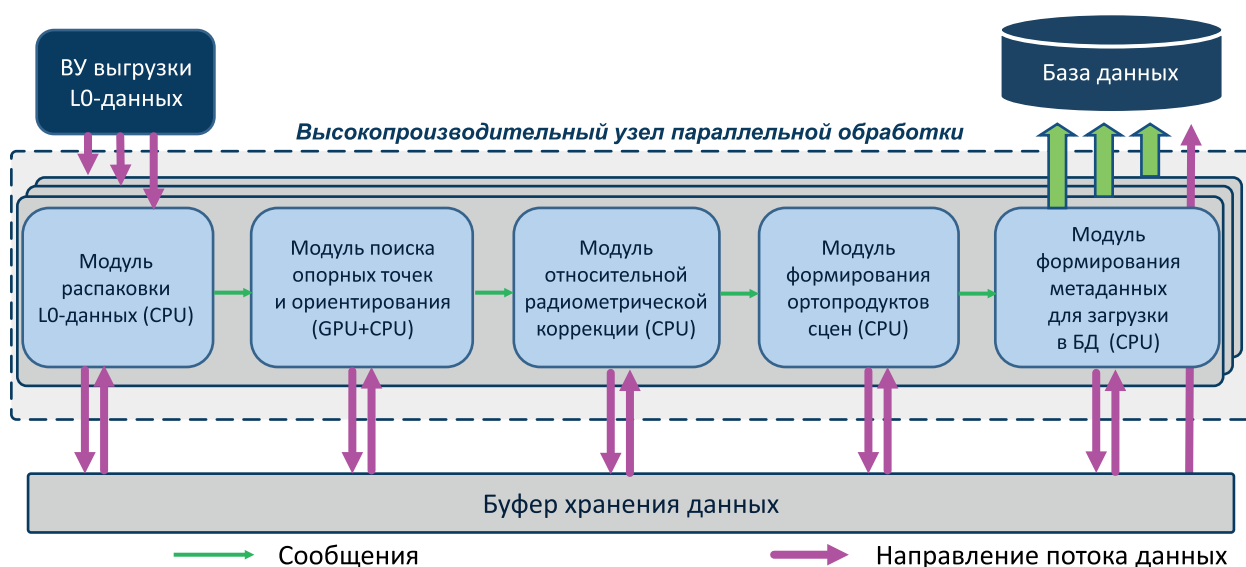


Рис. 4. Общая технологическая схема автоматической потоковой обработки данных КА «Канопус-В» в рамках технологического контура ББП

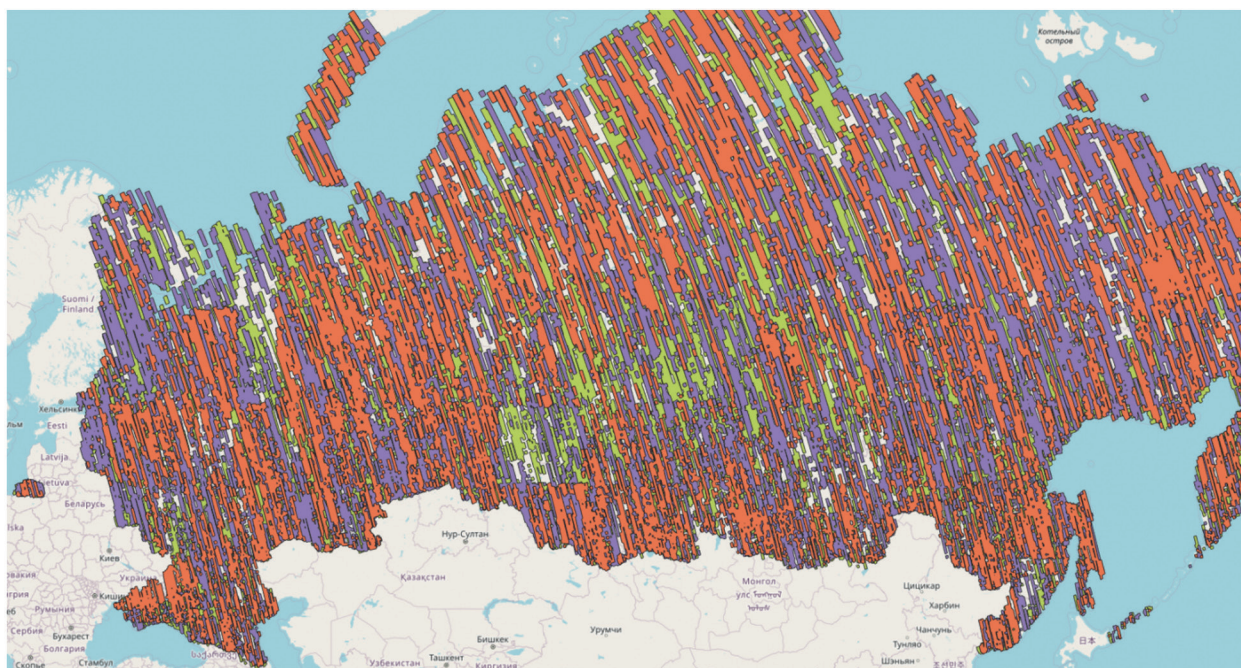


Рис. 5. Покрытие территории РФ данными группировки КА типа «Канопус-В», снятыми за 2020–2022 гг. (зарегистрированы в каталоге ББП): зелёный цвет — 2020 г., фиолетовый — 2021 г., оранжевый — 2022 г.

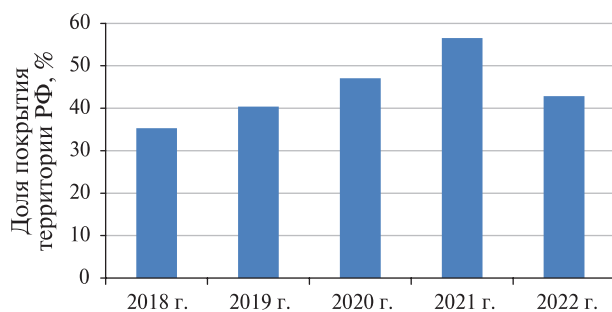


Рис. 6. Распределение процентного покрытия территории РФ обработанными данными по годам съёмки (в период май – октябрь), используемыми для формирования БСП

По результатам обработки продукты загружались в каталог ББП, в том числе для удобства отбора сцен маршрутов на каждый из фрагментов 5×5°. При этом был сформирован буфер, содержащий zip-архивы сцен маршрутов съёмки объёмом около 70 ТБ. На рис. 5 (см. с. 101) приведено покрытие территории РФ данными архива ББП за трёхлетний период 2020–2022 гг. Распределение (в %) покрытия территории РФ обработанными данными по годам съёмки (в период май – октябрь), используемыми для формирования БСП, демонстрируется на рис. 6.

Технология формирования бесшовных сплошных покрытий территории РФ

Технологическая схема формирования БСП приведена на рис. 7. На схеме отмечены основные этапы автоматической обработки данных (синим цветом), а также этапы интерактивной обработки с участием оператора (серым). Также определены блоки хранения данных и продуктов обработки. Сплошные стрелки задают основной технологический контур движения данных между этапами обработки.

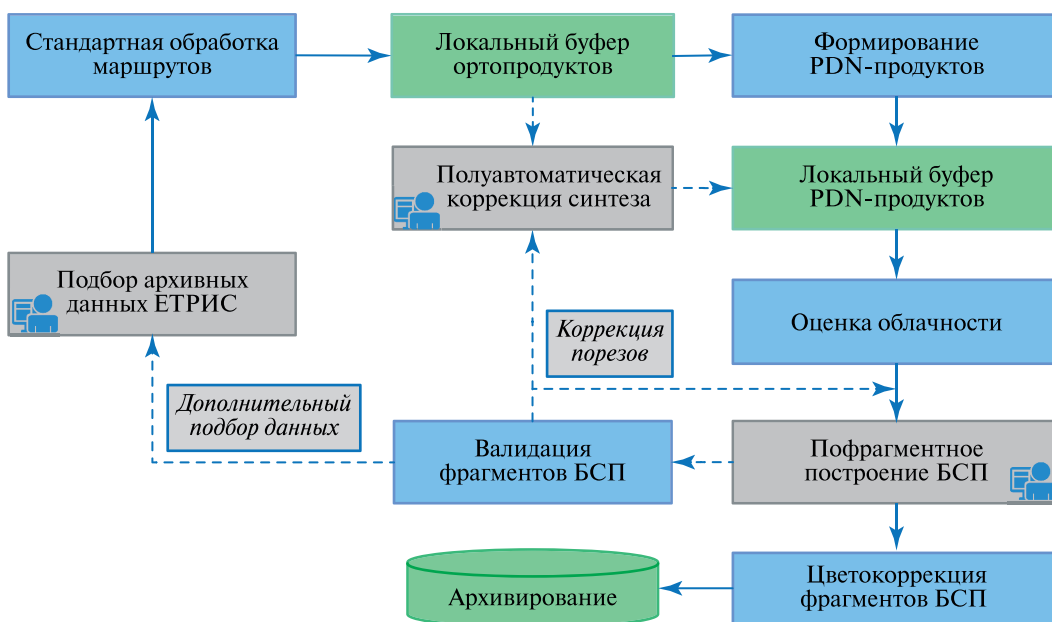


Рис. 7. Технологическая схема формирования БСП территории РФ (PDN-продукт (англ. Pansharpned digital numbers) — продукт, сформированный на основе «паншарп»-алгоритмов, обеспечивающих повышение пространственного разрешения спектральных каналов на основе комплексирования с панхроматическим каналом более высокого разрешения)

Пунктирные стрелки на рис. 7 определяют вспомогательные действия, обусловленные контролем и повышением качества входных данных и результатов их обработки. Далее подробнее рассмотрим этапы обработки данных основного технологического контура.

Формирование PDN-продуктов осуществляется на основе преобразования Бровея, рассмотренного в работе (Zhou et al., 1998) (пример изобразительных особенностей изображения PDN-продукта на основе данного алгоритма приведён на рис. 8):

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \frac{3PAN}{R+G+B} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix},$$

где R' , G' , B' — цифровой отсчёт для красного, зелёного, синего спектральных каналов PDN-продукта соответственно в заданном пикселе; PAN — цифровой отсчёт для панхроматического спектрального канала (ПСС) заданного пикселя; R , G , B — цифровой отсчёт для красного, зелёного, синего спектральных каналов МСС соответственно в том же пикселе при условии интерполяции изображений спектральных каналов к пространственному разрешению панхроматического изображения.

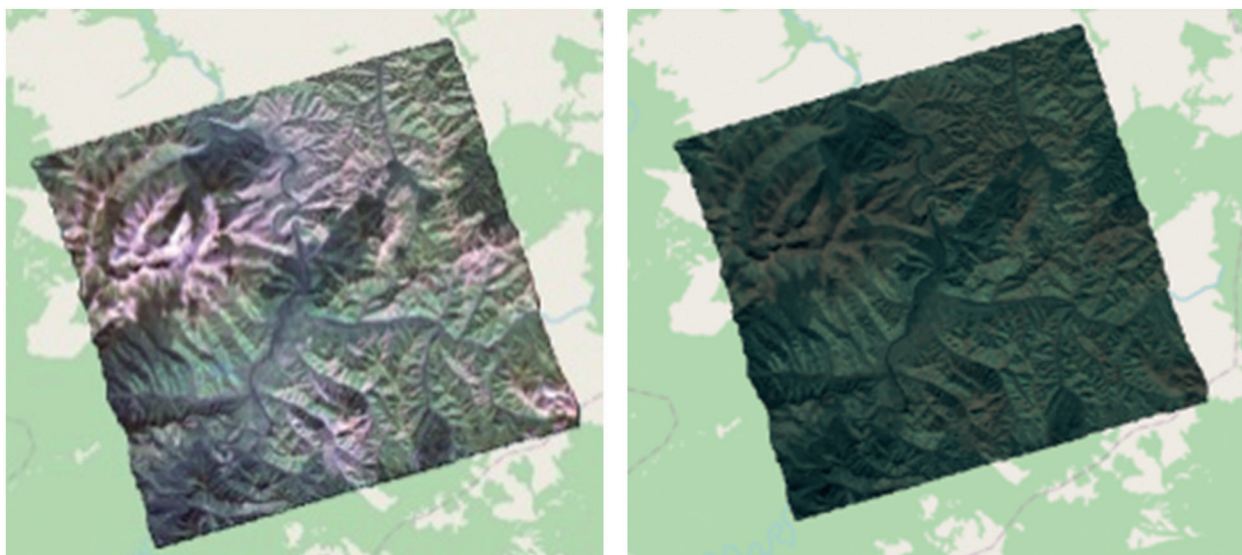


Рис. 8. Изображения исходных (слева) данных МСС КА «Канопус-В» и PDN-продукта той же сцены (справа). Характерной особенностью изображения PDN-продукта является изумрудный оттенок (изображения представлены в естественных RGB-цветах (англ. Red, Green, Blue — красный, зелёный, синий))

Дополнительно в ходе формирования PDN-продуктов осуществлялся контроль качества синтеза исходных данных с целью категоризации сцен на группы. Контроль качества включал: 1) приведение PAN-изображения к пространственному разрешению МСС; 2) поблочное (размер блока не более 1000×1000 пикселей) сопоставление изображений панхроматического и RGB-каналов на основе метрики кросс-корреляции в окрестности допустимого отклонения ошибок синтеза (окно поиска — не более 10×10 пикселей); 3) в зависимости от количества блоков, содержащих ошибки, выполнялась категоризация. На рис. 9 (см. с. 104) приведён пример результатов оценки качества синтеза для красного канала МСС.

Используя технологию OpenCL (<https://www.khronos.org/opencl/>), обеспечивалось формирование более 5000 PDN-продуктов сцен в сутки на основе вычислительного узла следующей конфигурации: AMD EPYC 75f3 (2.95 GHz) — 2 шт., RAM 1024 GB, NVidia V100 — 4 шт. При этом в рамках формирования дополнительно выполнялась первичная оценка качества синтеза и категоризация сцен, а также перепроецирование изображений в единую картогра-

фическую проекцию в рамках фрагмента (в частности, использовалась нормальная равно-
ликая коническая проекция Альберса).

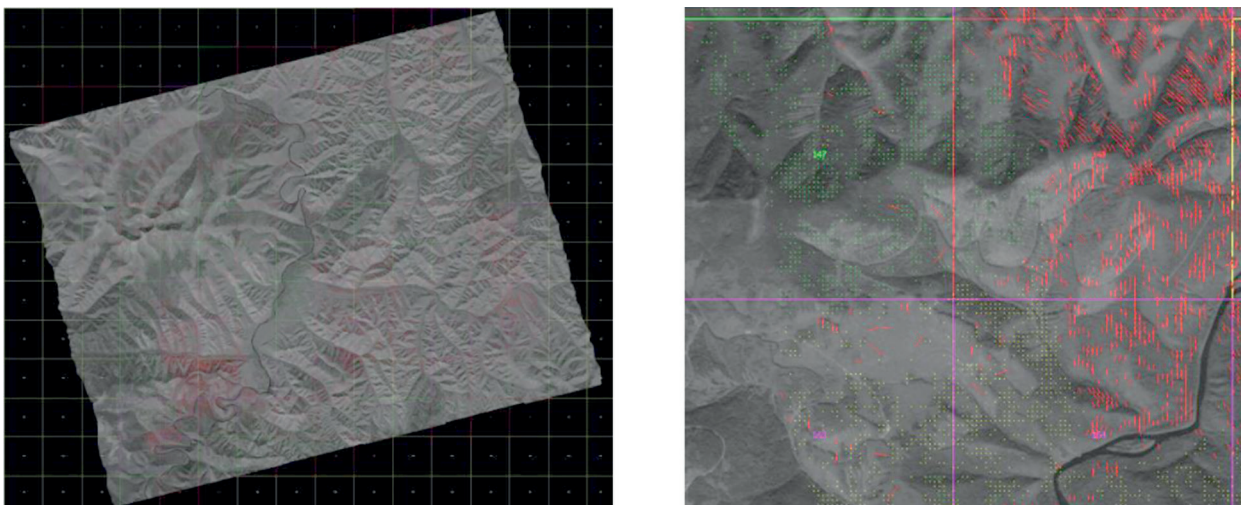


Рис. 9. Результат оценки качества синтеза панхроматического и красного каналов сцены КА «Канопус-В» (слева); увеличенный фрагмент отдельных блоков (справа). Красным цветом отмечены векторы сдвига между спектральными каналами с ошибкой синтеза более 30 м

Оценка облачности и анализ полноты покрытия выполнялись на основе обработки множества PDN-продуктов области фрагмента $5 \times 5^\circ$. При этом анализ полноты покрытия проводился на основе масок облачности, сформированных для заглубленных PDN-изображений (приведённых к пространственному разрешению $GSD = 20$ м). После чего осуществлялось агрегирование масок в рамках единого изображения фрагмента $5 \times 5^\circ$ на основе выбора минимального значения уровня облачности заданного пикселя среди множества масок сцен, включающих рассматриваемый пиксель. На рис. 10 демонстрируются примеры обработки различных фрагментов для анализ полноты покрытия данными (приведёнными к пространственному разрешению $GSD = 1$ км). При этом следует отметить, что для оценки маски облачности применялся алгоритм сегментации на основе свёрточной нейронной сети архитектуры MobileNet (Howard et al., 2017), для которого предварительно выполнялась разметка PDN-продуктов и обучение свёрточной нейронной сети (точность и F1-мера детектирования облачности составляли $\sim 75\%$).

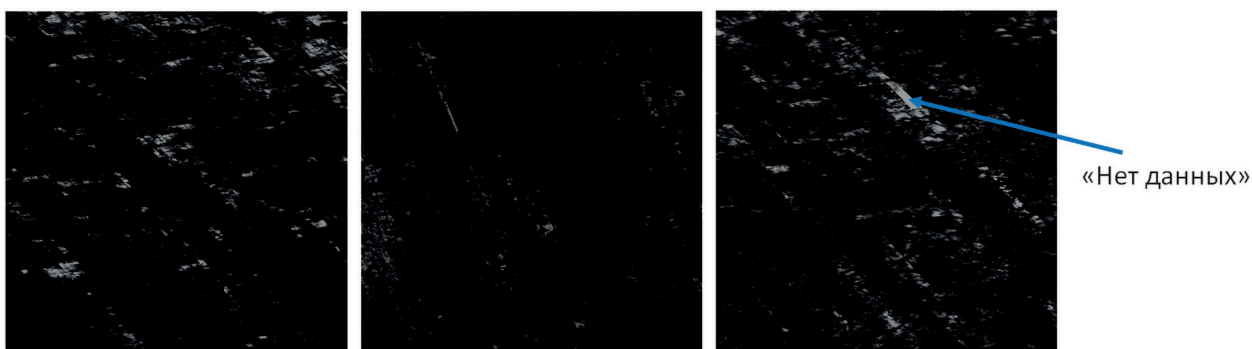
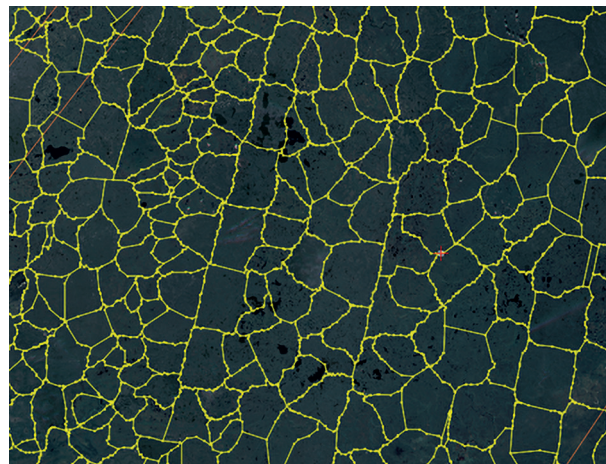


Рис. 10. Пример обработки различных фрагментов на анализ полноты покрытия данными. Чем ярче пиксель, тем выше уровень облачности, либо отсутствуют данные съёмки

Время обработки более 5000 PDN-продуктов при анализе полноты покрытия составляет около 1,5 ч на базе вычислительного узла следующей конфигурации: Intel Xeon Gold 5220R (2.8 GHz) — 2 шт., Nvidia Tesla V100S, RAM 768 GB.

Рис. 11. Пример построения линий порезов с учётом выполненного яркостного выравнивания для фрагмента БСП с использованием ПО Photomod Geomosaic



Пофрагментное построение БСП

заключалось в объединении множества PDN-продуктов, обеспечивающем цельное безоблачное мозаичное изображение. Описание методических и алгоритмических подходов к созданию БСП можно найти, например, в работе (Li et al., 2019). При этом основная сложность формирования мозаичного изображения состоит в задании корректных границ безоблачной области каждого снимка, используемой в мозаике. Корректные границы обеспечивают бесшовность единого изображения, при этом расчёт данных границ выполняется на основе определения линий порезов в области перекрытия смежных снимков, например, с использованием критерия похожести яркости и текстуры (Kerschner, 2001). В рамках настоящей работы для построения БСП использовалось программное обеспечение (ПО) Photomod Geomosaic, включающее: 1) автоматическое создание и интерактивное редактирование линий порезов; 2) яркостное выравнивание между смежными снимками; 3) формирование результирующего покрытия в виде единого растрового изображения. На рис. 11 демонстрируются линии порезов с учётом выполненного яркостного выравнивания для фрагмента БСП.

При этом следует отметить, что корректность проведения линий порезов, исключающих облака и тени от облаков, обеспечивалась оператором. В свою очередь, на рис. 12 показаны примеры исходных данных, используемых для формирования покрытия на фрагмент $5 \times 5^\circ$.

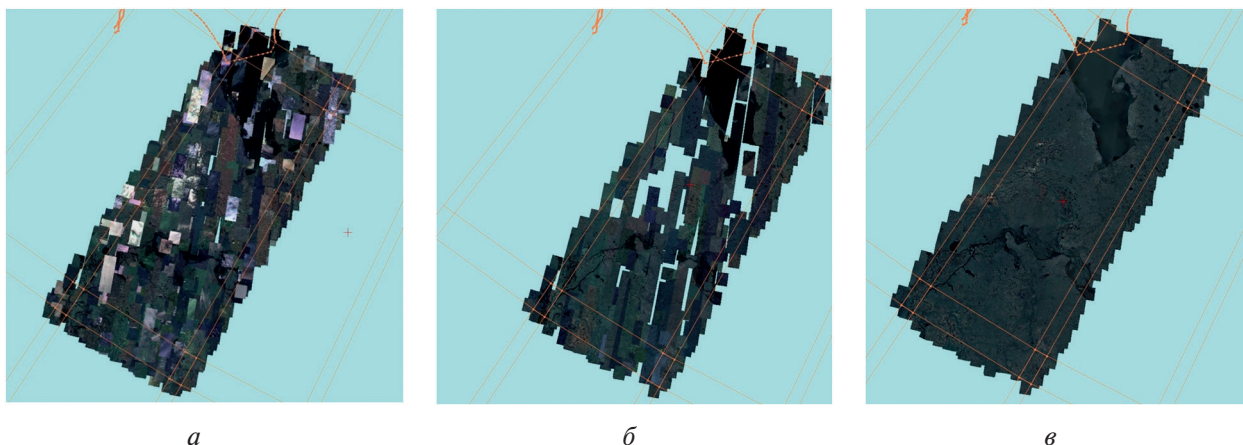


Рис. 12. Схема обработки данных фрагмента БСП: а — первоначальный набор PDN-продуктов (для временного диапазона 2020–2022 гг.); б — набор продуктов с учётом результата анализа полноты покрытия; в — БСП, сформированное по результатам дополнительного добора PDN-продуктов (съёмка 2018–2019 гг.) для детектированных пустот

Интерактивная работа в проекте ПО Photomod Geomosaic при формировании фрагмента БСП составляла от 16 до 40 ч работы оператора. Трудность заключалась в сведении данных съёмки, полученных при различных временных и погодных условиях (а также ошибок синтеза изображений спектральных каналов). При этом немаловажным фактором была продолжительность формирования результирующего изображения, для которого в рамках используемого

ПО Photomod Geomosaic (версии 6.4.2306) распараллеливание не было предусмотрено (требовалась дополнительная закупка модуля).

Ввиду данных обстоятельств был предложен алгоритм яркостного выравнивания (Васильев и др., 2022в) с целью последующего формирования единого изображения фрагмента БСП на основе линий порезов, построенных и экспортированных средствами Photomod. Алгоритм включал три этапа обработки: 1) расчёт корректирующих поправок для каждого спектрального канала каждой сцены на основе минимизации разности между средним значением и среднеквадратическим отклонением (СКО) смежных сцен; 2) локальное яркостное выравнивание на основе расчёта средних яркостных коэффициентов (для спектральных каналов) в области линии пореза смежных сцен с учётом уменьшения их влияния при удалении от линии пореза; 3) в области границы смежных сцен дополнительно выполнялось «размытие», обеспечивающее бесшовность. С учётом распараллеливания и конвейерной схемы обработки предложенный подход обеспечивал качество яркостного выравнивания, сопоставимое с Photomod. При этом для обработки более 2000 сцен PDN-продуктов данных КА «Канопус-В» требовалось приблизительно в 2,2 раза меньше времени (на одном и том же вычислительном узле).

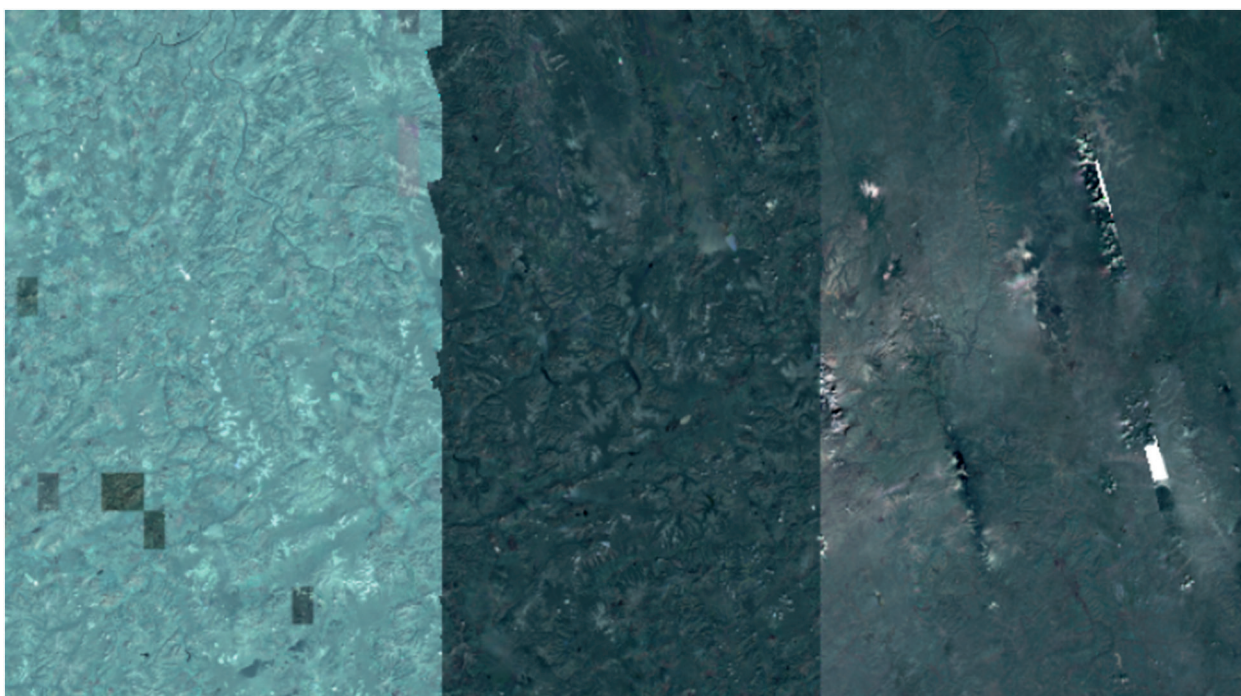


Рис. 13. Пример отображения трёх фрагментов БСП, для которых выполнено яркостное выравнивание внутри каждого из них. Наблюдается характерное различие яркости между смежными фрагментами

В результате для каждого отдельного фрагмента БСП обеспечивалось яркостное выравнивание и однородный цветовой баланс, однако между смежными фрагментами наблюдалось существенное различие яркостных и цветовых характеристик (рис. 13). Поэтому для формирования единого тонально сбалансированного цельного покрытия выполнялась *цветовая коррекция фрагментов БСП* в два этапа:

1. Глобальное выравнивание яркости с использованием опорного выровненного покрытия (в частности, применялось покрытие Planet). Область покрытия фрагмента разбивалась на основе некоторого грида (не менее 1000×1000 пикселей), для каждого узла грида по окрестности оценивались статистические характеристики (среднее и СКО), на основе которых рассчитывались корректирующие коэффициенты для узла грида. В свою очередь, расчёт корректирующего коэффициента каждого пикселя фрагмента

оценивался на основе билинейной интерполяции между значениями коэффициентов смежных узлов грида.

2. С целью локального выравнивания между смежными фрагментами БСП при формировании обеспечивалось перекрытие в $0,25^\circ$. В области перекрытия также оценивались статистические характеристики, на основе которых рассчитывались корректирующие коэффициенты.

Результирующее выравненное БСП территории РФ (в нормальной равноугольной цилиндрической проекции Web Mercator) приведено на *рис. 14*, где оно представлено с использованием технологии, описанной в работе (Васильев и др., 2024).



Рис. 14. Бесшовное сплошное покрытие территории РФ, построенное на основе объединения сформированных фрагментов с учётом их цветовой коррекции

Доступ к БСП осуществляется посредством геоинформационного веб-сервиса «Банк базовых продуктов» (Марков и др., 2019), а также с использованием QGIS-плагина (Мешков и др., 2022). При этом использование сформированного покрытия целесообразно преимущественно в виде базового картографического слоя (картографическая подложка) в геоинформационных системах и сервисах. В настоящее время (2024) к БСП уже имеют доступ ведомственные и региональные организации РФ (после официального обращения в Государственную корпорацию Роскосмос). Ввиду высокого пространственного разрешения созданной мозаики (GSD около 2,4 м) со стороны потребителей обозначен явный интерес к ежегодному обновлению данного покрытия, преимущественно для решения картографических задач, например, связанных с актуализацией границ сельскохозяйственных полей.

Контроль качества сформированного бесшовного сплошного покрытия территории РФ

Контроль качества фрагментов БСП заключался в оценке качества геореференцирования изображений фрагментов, а также анализе качества совмещения изображений спектральных каналов фрагментов. Для этого применялась поблочная стратегия, в рамках которой изображение фрагмента разбивалось на блоки. Для каждого блока выполнялось сопоставление

с опорным изображением (в частности покрытием Planet) для оценки качества геопроецирования либо сопоставление между собой изображений спектральных каналов для оценки качества совмещения. При этом изображения спектральных каналов извлекались на основе особенностей преобразования Бровея, для которого допустима обратная декомпозиция PDN-продукта с точностью до множителя K в заданном пикселе.

$$PAN = (R' + G' + B')/3,$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \frac{K}{3PAN} \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix}.$$

На *рис. 15* приведён пример фрагмента БСП, для которого выполнен анализ качества совмещения красного и панхроматического спектральных каналов. Совмещение изображений проводилось на основе метода SIFT (англ. Scale-Invariant Feature Transform) (Lowe, 2004), после чего оценивался систематический сдвиг (с учётом фильтрации ложных соответствий). Цветом отмечены найденные соответствия, для которых выполнена оценка смещения: зелёным — менее 3 пикселей, жёлтым — 3–5 пикселей, красным — 5–10 пикселей, пурпурным — более 10 пикселей.

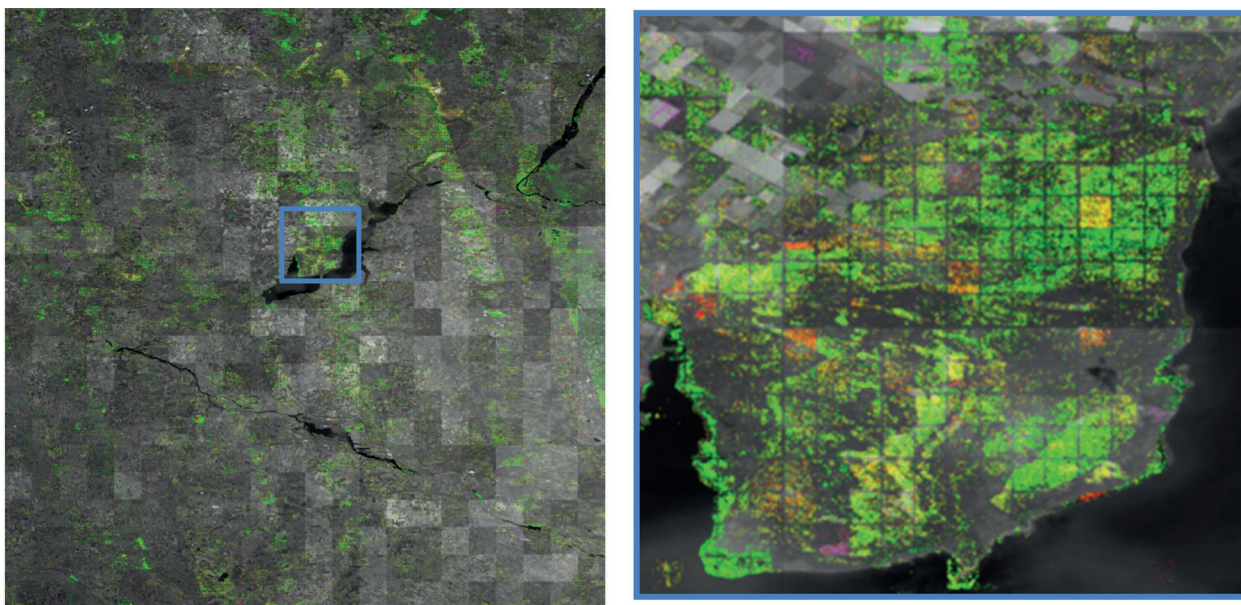


Рис. 15. Пример фрагмента БСП (*слева*), для которого выполнен анализ качества совмещения красного спектрального канала и панхроматического. Синим квадратом отмечена увеличенная область фрагмента БСП

По результатам автоматического анализа выполнялась оценка количества зелёных/жёлтых или красных точек на область снимка с целью идентификации проблемных локаций. Пример такой оценки приведён на *рис. 16* (см. с. 109). В свою очередь, повышение качества совмещения в проблемных локациях осуществлялось с использованием специального программного обеспечения, задействующего модель полуавтоматической коррекции, заимствованную из работы (Кузнецов и др., 2014): 1) выполняется указание точек в окрестностях ошибочного синтеза спектральных каналов; 2) для данной окрестности осуществляется поиск локального максимума между изображениями спектральных каналов на основе метрики кросс-корреляции; 3) для скорректированных координат окрестности осуществляется нелинейная деформация изображений спектральных каналов на основе подхода, изложенного в работе (Gillman, 1985). На *рис. 17* (см. с. 109) приведён снимок экрана данного ПО, обеспечивающего повышение качества синтеза спектральных каналов.

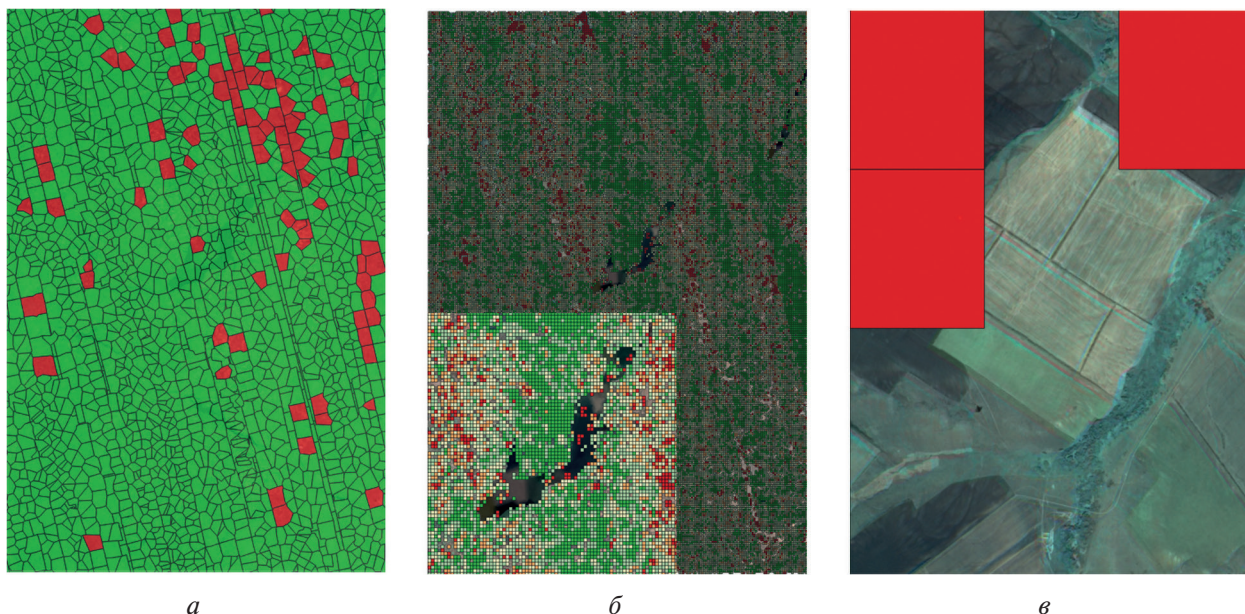


Рис. 16. Пример оценки качества совмещения на основе подсчёта количества зелёных/жёлтых или красных точек детектированных соответствий (по результатам автоматического анализа) на область снимка с целью идентификации проблемных локаций: *а* — границы линий порезов; *б* — результат дискретизации области фрагментов на основе выбора доминирующих точек; *в* — снимок, для которого идентифицированы проблемные локации

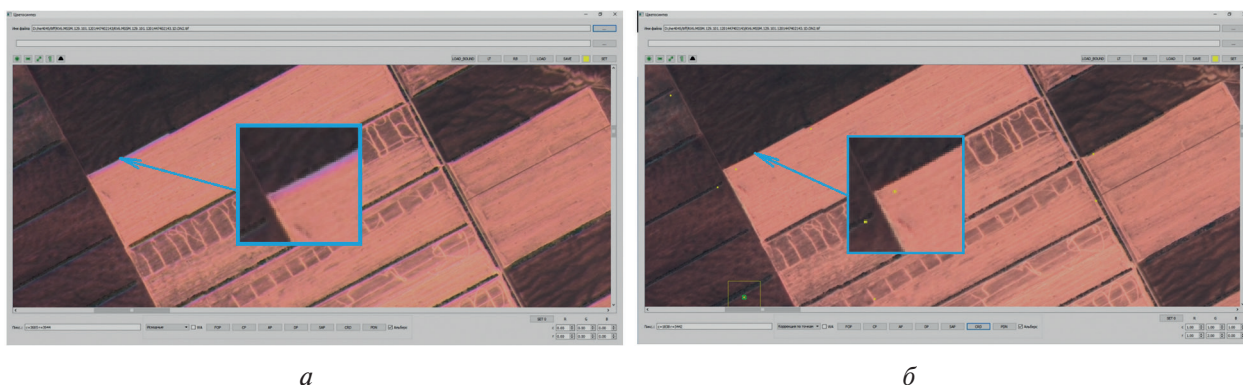


Рис. 17. Пример полуавтоматического повышения качества синтеза: *а* — исходное изображение; *б* — результат коррекции (синим цветом показан увеличенный фрагмент обрабатываемого изображения, жёлтым отмечены точки, выбранные оператором для обеспечения сведения изображений спектральных каналов)

Экспериментальные оценки производительности технологии формирования бесшовных сплошных покрытий территории РФ

Вычислительная инфраструктура, использованная для формирования БСП (без учёта стандартной обработки), включала два узла хранения для ведения архивов стандартных продуктов и сформированных PDN-продуктов, узел автоматической обработки, а также узел контроля качества. Кроме того, задействовались четыре рабочих места операторов для интерактивной работы. На *рис. 18* (см. с. 110) приведены используемые вычислительные узлы инфраструктуры, включая их характеристики. При этом на *рис. 19* показано распределение (в %) затрачиваемого времени по отдельным этапам обработки (относительно суммарного) при формировании фрагмента БСП.

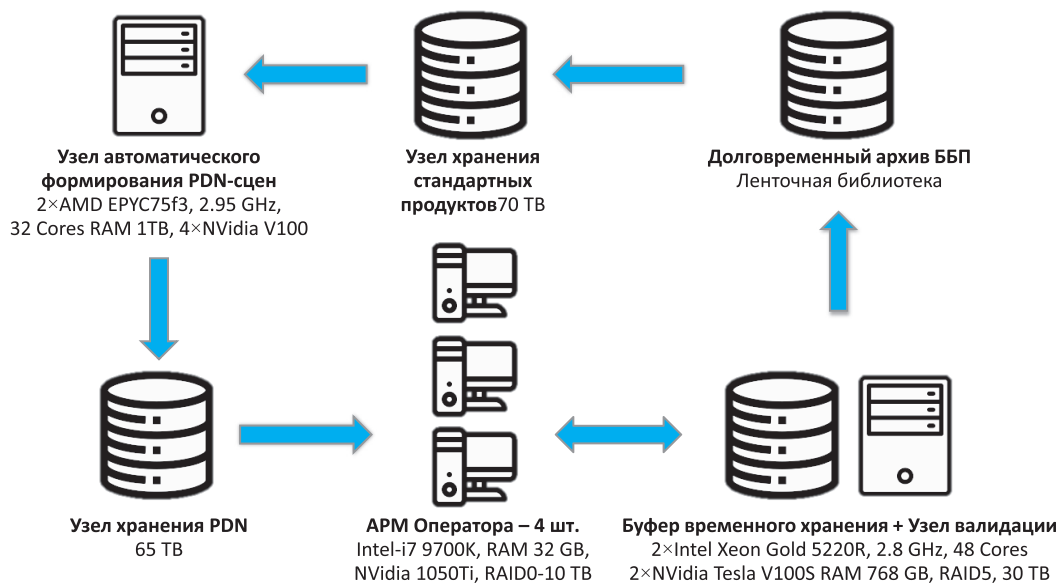


Рис. 18. Вычислительные ресурсы, используемые для формирования БСП территории РФ по данным КА «Канопус-В»

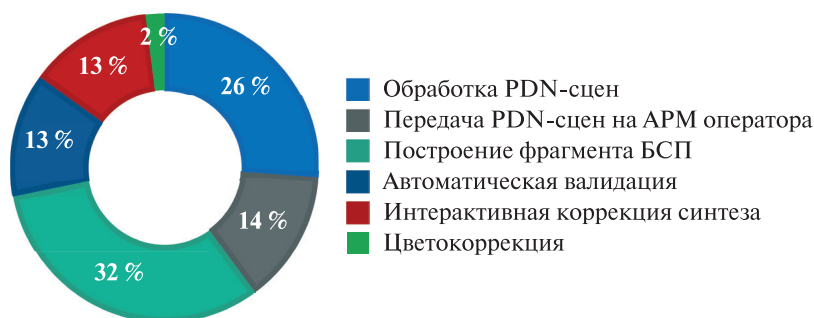


Рис. 19. Распределение времени по отдельным этапам обработки при формировании фрагмента БСП

В табл. 2 приведены абсолютные оценки времени выполнения отдельных этапов обработки. Суммарное оценочное время обработки одного фрагмента — около 90 ч (при условии, что для формирования покрытия фрагмента в среднем используется около 5000 сцен). При этом более 30 % времени (относительно суммарного) используется для формирования фрагмента БСП оператором. Учитывая, что обработка фрагментов выполняется в конвейерном режиме, операторы могут одновременно держать в работе три-четыре фрагмента. Соответственно, для формирования покрытия территории РФ высокого разрешения по данным группировки КА «Канопус-В» требуется около года с использованием вычислительной инфраструктуры, показанной на рис. 18.

Таблица 2. Абсолютные оценки времени выполнения отдельных этапов формирования фрагмента БСП 5×5°

Этап технологического процесса	Затраченное время, ч (при обработке ~5000 PDN-сцен)
Формирование PDN-сцен	24
Копирование PDN-сцен на АРМ оператора	13
Построение фрагмента БСП	16–40
Валидация (с учётом работы оператора)	24
Цветокоррекция	2

Примечание: АРМ — автоматизированное рабочее место.

Заключение

Рассматривается технология формирования бесшовных сплошных покрытий (БСП) территории РФ на основе данных группировки космического аппарата типа «Канопус-В», включая анализ архивов Оператора российских космических систем ДЗЗ, особенности стандартной обработки, а также контроль качества данных и продуктов их обработки. Отмечается, что БСП территории РФ допустимо формировать на основе данных преимущественно пятилетнего периода съёмки (май–октябрь 2018–2022 гг.), при этом для северных территорий страны используются также архивные данные более раннего периода. Демонстрируются технологические особенности обработки данных и пофрагментного формирования БСП территории РФ, предварительно разделённой с использованием регулярной сетки (размер ячейки $5 \times 5^\circ$). При этом отдельно освещены вопросы контроля синтеза спектральных каналов данных и сформированных фрагментов БСП. Для приведённой технологии отмечена производительность отдельных этапов обработки данных, а также задействованные вычислительные ресурсы, обеспечивающие формирование покрытия территории РФ не более чем за год.

Тенденции создания многоспутниковых отечественных космических систем дистанционного зондирования Земли высокого разрешения (включая федеральную целевую программу «Сфера»), в том числе для регламентированного ежедневного мониторинга всей территории РФ, обуславливают крайнюю актуальность рассматриваемой в настоящей статье технологии. Поэтому её естественным развитием становится адаптация для создания регламентированных ежегодных покрытий по данным спутника «Канопус-В» с учётом уменьшения доли интерактивной обработки.

Литература

1. Васильев А. И., Крылов А. В., Панкин А. В. Стандартная обработка данных КШМСА КА «Ресурс-П» в обеспечение автоматического формирования бесшовного сплошного покрытия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 18–28. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-18-28.
2. Васильев А. И., Крылов А. В., Алексеевский А. С. и др. Поточковая обработка данных группировки КА Канопус-В в обеспечение формирования базовых продуктов ДЗЗ // Материалы 18-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2020. С. 431. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
3. Васильев А. И., Крылов А. В., Мешков М. В., Пестряков А. А., Евлашкин М. А. (2022а) Технология потокового формирования базовых продуктов ДЗЗ по данным МСУ-МР КА «Метеор-М» // Дистанц. зондирование Земли из космоса в России. 2022. Вып. 1. С. 32–37.
4. Васильев А. И., Михеев А. А., Мешков М. В., Пестряков А. А. (2022б) Проблемные вопросы формирования глобального покрытия по данным КМСС КА «Метеор-М» // Материалы 10-й Международ. научно-техн. конф. «Актуальные проблемы создания косм. систем дистанц. зондирования Земли». 2022. С. 113–117. https://www.vniem.ru/ru/uploads/files/conferences/220929/materialy_2022.pdf.
5. Васильев А. И., Пестряков А. А., Михеев А. А., Мурашова И. Д. (2022в) Особенности формирования тонально сбалансированного покрытия глобального уровня по данным КМСС КА «Метеор-М» // Материалы 20-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2022. С. 85. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
6. Васильев А. И., Ольшевский Н. А., Синяев П. А., Пестряков А. А. Особенности технологий онлайн предоставления мозаичных сплошных покрытий российских КА ДЗЗ // Информация и Космос. 2024. № 2. С. 132–140.
7. Горбунов А. В., Слободской И. Н. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» // Геоматика. 2010. № 1. С. 30–33.
8. Кузнецов А. Е., Побаруев В. И., Пошехонов В. И., Пресняков О. А. Программный комплекс обработки информации от сканерно-кадровых съёмочных систем КА «Канопус-В» и «БКА» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 287–300.
9. Марков А. Н., Васильев А. И., Ольшевский Н. А. и др. Особенности доступа к ресурсам геоинформационного сервиса «Банк базовых продуктов» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 228–237. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-228-237.

10. Марков А. Н., Васильев А. И., Ольшевский Н. А. и др. (2020а) Технологии ведения банка базовых продуктов ДЗЗ для задач цифровой экономики РФ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 79–90. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-79-90.
11. Марков А. Н., Васильев А. И., Крылов А. В. и др. (2020б) Особенности обработки данных сенсора «Геотон-Л1» космического аппарата «Ресурс-П» при формировании бесшовных сплошных покрытий регионов РФ // Ракетно-косм. приборостроение и информ. системы. 2020. Т. 7. Вып. 1. С. 72–83. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.72.83.
12. Мешков М. В., Евлашкин М. А., Васильев А. И. Разработка плагина геоинформационной системы QGIS для доступа к ресурсам веб-сервиса «Банк базовых продуктов» // Ракетно-косм. приборостроение и информ. системы. 2022. Т. 9. Вып. 3. С. 13–18. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2022.9.3.13.18.
13. Плотников Д. Е., Колбудаев П. А., Жуков Б. С. и др. Публикация коллекции мультиспектральных измерений прибором КМСС-М (КА «Метеор-М» № 2) для количественной оценки характеристик земной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 276–282. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-276-282.
14. Прошин А. А., Лупян Е. А., Балашов И. В. и др. Технология динамического блочного представления спутниковых данных системам распределённой обработки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 79–93. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-79-93.
15. Прошин А. А., Лупян Е. А., Матвеев А. М. и др. Организация обработки данных КМСС на основе использования системы динамического блочного доступа к данным // Материалы 19-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва. ИКИ РАН. 2021. С. 107. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
16. Селин В. А., Марков А. Н., Васильев А. И., Коршунов А. П. Геоинформационный сервис «Банк базовых продуктов» // Ракетно-косм. приборостроение и информ. системы. 2019. Т. 6. Вып. 1. С. 40–48. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2019.6.1.40.48.
17. Федоткин Д. И., Боровенский Е. Н., Сысенко Д. В. и др. Автоматическая обработка данных космической съёмки в наземном сегменте отечественной многоспутниковой группировки КА ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 9–30. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-9-30.
18. Aparna N. NRSC Satellite Data Products and Services // User Interaction Meet-2022. 2022. https://www.nrsc.gov.in/sites/default/files/pdf/ebooks/UIM-2022/uim_5.pdf.
19. Gillman D. W. Triangulations for Rubber-Sheeting // Auto Carto 7 Conf. 1985. P. 191–199.
20. Howard A. G., Zhu M., Chen B. et al. MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications // <https://arxiv.org/>. 2017. <https://arxiv.org/abs/1704.04861>.
21. Kerschner M. Seamline detection in color orthoimage mosaicking by use of twin snakes // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2001. Iss. 56(1). P. 53–64. DOI: 10.1016/s0924-2716(01)00033-8.
22. Kirches G., Brockmann C., Riffler M. Algorithm Theoretical Basis Document. Sentinel-2 Global Mosaics, S2GM-SC2-ATBD-BC. Issue Data: 29-October-2019. Issue: 1.3.1 https://usermanual.readthedocs.io/en/1.1.2/_downloads/5a2d961d53dea1eb1117ec73e4cbff09/S2GM-SC2-ATBD-BC-v1.3.2.pdf.
23. Li X., Feng R., Guan X. et al. Remote sensing image mosaicking: Achievements and challenges // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2019. V. 7. No. 4. P. 8–22. DOI: 10.1109/MGRS.2019.2921780.
24. Lowe D. G. Distinctive image features from scale invariant key points // Intern. J. Computer Vision. 2004. V. 60. P. 91–110. DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
25. Wiatr T. Delivering free, seamless, cloudless mosaic images of Europe to the world. // EuroGeographics. Data Producer Meeting. 2020. <https://eurogeographics.org/app/uploads/2020/10/Session-4-Delivering-free-seamless-cloudless-mosaic-images-BKG.pdf>.
26. Zhang H. Landsat analysis ready data: algorithms and application demonstrations with deep learning based land cover mapping // 6th Asia-Oceania Group on Earth Observations (AOGEO) Workshop. 2023. <https://conferences.cis.um.edu.mo/AOGEO-workshop-2023>.
27. Zhou J., Civco D. L., Silander J. A. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT Panchromatic data // Intern. J. Remote Sensing. 1998. Iss. 19(4). pp. 743–757. DOI: 10.1080/014311698215973.

Technology for creating seamless continuous coverage of Russian territory based on Kanopus-V satellites data

A. N. Markov, A. I. Vasilyev, A. V. Krylov, A. A. Mikheev, A. A. Pestryakov,
S. V. Romaikin, R. A. Mikhalekov, I. D. Murashova, A. A. Akimov

Research Center for Earth Operative Monitoring, Moscow 127490, Russia
E-mail: nova@ntsomz.ru

As part of the domestic Earth Remote Sensing (ERS) orbital constellation, the high-resolution Kanopus-V satellites (up to 6 operational satellites) are utilized. These satellites conduct regular surveys of the Russian territory to solve various applied scientific and national economy tasks. This article presents a technology for creating seamless continuous coverage of the entire country based on data from the Kanopus-V satellites, primarily collected from 2018 to 2022. First, an analysis of the archives from the Russian ERS satellite operator was conducted to construct a minimally cloudy, continuous coverage of the Russian Federation territory. Second, standard data processing was carried out, and a buffer of ortho products from Kanopus-V satellite data was generated. Third, the Russian territory was divided into segments using a regular grid with $5 \times 5^\circ$ cells. Ortho products were selected for each grid cell and seamless continuous coverage was generated using photogrammetric software in interactive mode. Fourth, the resulting mosaic was created, taking into account brightness adjustments. Finally, the features of automatic and interactive quality control during the creation of continuous coverage for individual segments or cells are discussed. Given that the creation of the mosaic based on the ortho products took about a year, the article also notes the distribution of processing time across various technological stages, leveraging available computing resources. In conclusion, further development of this technology is highlighted, with plans to establish regulated annual coverage and increase the degree of automation in its creation.

Keywords: remote sensing of the Earth, spacecraft, Kanopus-V, high spatial resolution, data processing, photogrammetry, seamless continuous coverage, mosaic, territory of the Russian Federation

Accepted: 19.09.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-97-115

References

1. Vasilyev A. I., Krylov A. V., Pankin A. V., Standard level processing of Resurs-P KShMSA data for automatic generation of seamless continuous coverage, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 18–28 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-18-28.
2. Vasilyev A. I., Krylov A. V., Alekseevskiy A. S., Mikheev A. A., Evlashkin M. A., Stream data processing of the Kanopus-V satellite constellation to ensure the formation of basic remote sensing products, *Materialy 18-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (18th All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 2020, p. 431 (in Russian), DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
3. Vasilyev A. I., Krylov A. V., Meshkov M. V., Pestryakov A. A., Evlashkin M. A. (2022a), Technology of streaming formation for basic remote sensing products according to MSU-MR data of the Meteor-M spacecraft, *Distantionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa v Rossii*, 2022, Issue 1, pp. 32–37 (in Russian).
4. Vasilyev A. I., Mikheev A. A., Meshkov M. V., Pestryakov A. A. (2022b), Problematic issues of formation for global coverage according to the KMSS data of the Meteor-M spacecraft, *Materialy 10-i Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Aktual'nye problemy sozdaniya kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli"* (10th Intern. Scientific and Technical Conf. "Current problems of creating space systems for remote sensing of the Earth"), 2022, pp. 113–117 (in Russian), https://www.vniem.ru/ru/uploads/files/conferences/220929/materialy_2022.pdf.
5. Vasilyev A. I., Pestryakov A. A., Mikheev A. A., Murashova I. D. (2022c), Features of the formation for a tonally balanced coverage of the global level according to the KMSS data of the Meteor-M spacecraft, *Materialy 20-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (20th Intern. Conf. "Current Problems of Remote Sensing of the Earth from Space"), 2022, p. 85 (in Russian), DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.

6. Vasilyev A. I., Olshevskiy N. A., Sinyaev P. A., Pestryakov A. A., Features of online delivery technologies for mosaic continuous coatings of Russian remote sensing satellites, *Informatsiya i Kosmos*, 2024, No 2, pp. 132–140 (in Russian).
7. Gorbunov A. V., Slobodskoi I. N., Space complex for operational monitoring of man-made and natural emergencies “Kanopus-V”, *Geomatics*, 2010, Issue 1, pp. 30–33 (in Russian).
8. Kuznetsov A. E., Pobaruiev V. I., Poshekhonov V. I., Presnyakov O. A., A software system for information processing from scanner-frame imaging systems SC “Canopus-V” and “BKA”, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 287–300 (in Russian).
9. Markov A. N., Vasilyev A. I., Olshevskiy N. A. et al., Access features to the Basic Product Bank geoinformation service resources, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 228–237 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-228-237.
10. Markov A. N., Vasilyev A. I., Olshevskiy N. A. et al. (2020a), The maintaining technologies of the basic products bank based on Earth remote sensing data for the tasks of the Russian Federation digital economy, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 79–90 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-79-90.
11. Markov A. N., Vasilyev A. I., Krylov A. V. et al. (2020b), Generation of Seamless Continuous Coverages of the Russian Regions Using Resurs-P Very-High Resolution Data, *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2020, Vol. 7, Issue 1, pp. 72–83 (in Russian), DOI: 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.72.83.
12. Meshkov M. V., Evlashkin M. A., Vasilyev A. I., Development of a plug-in for the QGIS geographic information system for accessing the resources of the Basic Products Bank Web Service, *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2022, Vol. 9, Issue 3, pp. 13–18 (in Russian), DOI: 10.30894/issn2409-0239.2022.9.3.13.18.
13. Plotnikov D. E., Kolbudaev P. A., Zhukov B. S. et al., The collection of multispectral KMSS-M (Meteor-M No. 2) satellite data aimed at quantitative assessment of the Earth surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 276–282 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-276-282.
14. Proshin A. A., Loupian E. A., Balashov I. V. et al., Technology of satellite data dynamic block provision to distributed processing systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 79–93 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-79-93.
15. Proshin A. A., Lupyan E. A., Matveev A. M. et al., Organization of KMSS data processing based on the use of a dynamic block data access system, *Materialy 19-i Mezhdunarodnoi konferentsii “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”* (19th Intern. Conf. “Current Problems of Remote Sensing of the Earth from Space”), 2021, p. 107 (in Russian), DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
16. Selin V. A., Markov A. N., Vasilyev A. I., Korshunov A. P., Geoinformation service “Basic Product Bank”, *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2019, Vol. 6, Issue 1, pp. 40–48 (in Russian), DOI: 10.30894/issn2409-0239.2019.6.1.40.48.
17. Fedotkin D. I., Borovenskiy E. N., Sysenko D. V. et al., Automatic processing of space imagery in the ground segment of the domestic multi-satellite constellation of remote sensing spacecrafts, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, Vol. 21, No. 3, pp. 9–30 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-9-30.
18. Aparna N., NRSC Satellite Data Products and Services, *User Interaction Meet-2022*, 2022, https://www.nrsc.gov.in/sites/default/files/pdf/ebooks/UIM-2022/uim_5.pdf.
19. Gillman D. W., Triangulations for Rubber-Sheeting, *Auto Carto 7 Conf.*, 1985, pp. 191–199.
20. Howard A. G., Zhu M., Chen B. et al., MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications, <https://arxiv.org/>, 2017, DOI: 10.48550/arXiv.1704.04861.
21. Kerschner M., Seamline detection in colour orthoimage mosaicking by use of twin snakes, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, Issue 56(1), pp. 53–64, DOI: 10.1016/s0924-2716(01)00033-8.
22. Kirches G., Brockmann C., Riffler M., *Algorithm Theoretical Basis Document. Sentinel-2 Global Mosaics, S2GM-SC2-ATBD-BC*, Issue Data: 29-October-2019, Issue: 1.3.1, https://usermanual.readthedocs.io/en/1.1.2/_downloads/5a2d961d53dea1eb1117ec73e4cbff09/S2GM-SC2-ATBD-BC-v1.3.2.pdf.
23. Li X., Feng R., Guan X. et al., Remote sensing image mosaicking: Achievements and challenges, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2019, Vol. 7, No. 4, pp. 8–22, DOI: 10.1109/MGRS.2019.2921780.
24. Lowe D. G., Distinctive image features from scaleinvariant keypoints, *Intern. J. Computer Vision*, 2004, Vol. 60, pp. 91–110, DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
25. Wiatr T., Delivering free, seamless, cloudless mosaic images of Europe to the world, *EuroGeographics: Data Producer Meeting*, 2020, <https://eurogeographics.org/app/uploads/2020/10/Session-4-Delivering-free-seamless-cloudless-mosaic-images-BKG.pdf>.

26. Zhang H., Landsat analysis ready data: algorithms and application demonstrations with deep learning based land cover mapping, *6th Asia-Oceania Group on Earth Observations (AOGEO) Workshop*, 2023, <https://conferences.cis.um.edu.mo/AOGEO-workshop-2023>.
27. Zhou J., Civco D.L., Silander J.A., A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT Panchromatic data, *International J. Remote Sensing*, 1998, Issue 19(4), pp. 743–757, DOI: 10.1080/014311698215973.