

## Автоматическая обработка данных космической съёмки в наземном сегменте отечественной многоспутниковой группировки КА ДЗЗ

Д. И. Федоткин<sup>1</sup>, Е. Н. Боровенский<sup>1</sup>, Д. В. Сысенко<sup>1</sup>,  
А. В. Ядыкин<sup>1</sup>, П. А. Лошкарев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт точных приборов, Москва, 127490, Россия  
E-mail: iprs@mail.ru

<sup>2</sup> АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»  
Королёв, 141070, Московская обл., Россия  
E-mail: loshkarevpa@tsniimash.ru

Статья посвящена новым программным комплексам и технологиям автоматической обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), разработанным в рамках государственных контрактов по заказу Государственной корпорации «Роскосмос» в целях модернизации наземного сегмента отечественной орбитальной группировки космических аппаратов (ОГ КА) ДЗЗ. Рассмотрены предпосылки создания, основные преимущества и технические решения унифицированного комплекса автоматической потоковой обработки информации (АПОИ) как ключевого элемента единой территориально-распределённой информационной системы (ЕТРИС) ДЗЗ. Представлены основные характеристики и статистика успешной работы комплекса АПОИ по обработке данных с отечественных космических аппаратов (КА) ДЗЗ по заявкам потребителей в рамках обеспечения функционирования Федерального фонда данных дистанционного зондирования Земли (ФФД ДЗЗ). Рассмотрены ключевые технические решения и алгоритмы, реализованные в подсистеме обработки данных информационной системы «Цифровая Земля» (ИС ЦЗ), создаваемой как логическое продолжение модернизации отечественного наземного сегмента ДЗЗ. Представлены результаты высокоточной и высокопроизводительной автоматической обработки данных космической съёмки, включая построение сплошных бесшовных тонально сбалансированных ортокорректированных покрытий (ортомозаик) по заявкам потребителей. Приведены результаты анализа точностных характеристик создаваемых в автоматическом режиме ортомозаик, показывающие достижение точности геопривязки, сопоставимой с пространственным разрешением данных. Описанные программные комплексы позволили осуществить качественный переход в наземной обработке данных с отечественной ОГ КА ДЗЗ: от более полусотни задействованных в обработке операторов до полностью автоматической обработки; от более сотни единиц техники (преимущественно автоматизированных рабочих мест) до нескольких серверов; от обработки в течение нескольких часов и суток до обработки в течение нескольких минут; от точности геопривязки в десятки и сотни метров до единиц метров. Всё это обеспечит готовность наземного сегмента ДЗЗ к потоковой высокоточной обработке больших объёмов информации с проектируемых отечественных многоспутниковых группировок с сотнями КА на орбите и созданию оперативных тематических сервисов ДЗЗ на их основе.

**Ключевые слова:** наземный сегмент ДЗЗ, автоматическая потоковая обработка данных ДЗЗ, бесшовные ортомозаики, АПОИ, «Цифровая Земля»

Одобрена к печати: 12.04.2024  
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-9-30

### Введение

При построении современных космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), работающих в режиме близком к реальному времени, к наземной обработке информации предъявляются высокие требования в части автоматизации, надёжности, оперативности и качества обработки.

Устаревшая парадигма создания под каждый космический аппарат (КА) или, максимум, серию однотипных КА, собственного наземного комплекса приёма, обработки и распро-

странения информации (НКПОР) не может отвечать современным требованиям (Федоткин, Тохийн, 2018). Однако заложенные в отечественных НКПОР ещё два десятка лет назад технологии и подходы по обработке данных ДЗЗ часто продолжают использоваться в качестве задела при создании комплексов обработки и по сегодняшний день. При этом используемая ручная обработка оператором на автоматизированном рабочем месте (АРМ) изначально не была предназначена для обработки больших объёмов данных в оперативном режиме и, конечно, не отвечает современным требованиям.

### Предпосылки создания

Всё это привело к тому, что к 2018 г. только для обработки информации всего лишь с десятка КА ДЗЗ в наземном сегменте Оператора космических средств (КС) ДЗЗ (Научный центр оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы»), построенном на базе нескольких НКПОР, имело место неэффективное задействование огромного количества технических средств (более сотни единиц, преимущественно АРМ) и большого количества операторов (более полусотни), при этом оперативность обработки данных составляла несколько суток (Кушнырь, 2017). Очевидно, что в современных условиях, когда речь идёт о создании перспективных многоспутниковых группировок КА ДЗЗ, состоящих из десятков и сотен КА, и сотнях, даже тысячах потребителей информации, использование устаревшей парадигмы НКПОР неминуемо привело бы к ещё большему увеличению технических средств (преимущественно АРМ), катастрофическому увеличению штата операторов, и, как следствие, кратному увеличению стоимости эксплуатации.

Поэтому в рамках Единой территориально-распределённой информационной системы (ЕТРИС) ДЗЗ был взят курс на максимальную унификацию и стандартизацию всех технологических процессов от приёма данных до их обработки и выдачи потребителям посредством создания унифицированных (универсальных, единых) комплексов, предназначенных для всей отечественной орбитальной группировки КА ДЗЗ (Боровенский и др., 2023; Ромашкин и др., 2019).

### Ввод в эксплуатацию

В 2019 г. в АО «Научно-исследовательский институт точных приборов» по заказу Госкорпорации (ГК) «Роскосмос» был разработан и успешно прошёл испытания унифицированный комплекс автоматической потоковой обработки информации (АПОИ), спроектированный как единый комплекс обработки информации со всей орбитальной группировки КА ДЗЗ (Боровенский и др., 2023; Лошкарёв и др., 2020).

В период с сентября 2020 г. по октябрь 2021 г. комплекс АПОИ проходил опытную эксплуатацию, в ходе которой выполнял обработку заявок потребителей впервые в автоматическом режиме, в том числе обеспечивал качественными данными 10 пилотных регионов РФ для отработки проекта «Цифровая Земля — Сервисы» по заказу Государственной корпорации «Роскосмос» в рамках национальной программы «Цифровая экономика РФ» (Болтачёв, 2022; Лошкарёв и др., 2020).

С октября 2021 г. комплекс АПОИ введён в штатную эксплуатацию в контуре Оператора КС ДЗЗ и полностью в автоматическом режиме осуществляет обработку всех заявок российских потребителей (приём заявок осуществляется через геопортал Роскосмоса) в рамках эксплуатации Федерального фонда данных дистанционного зондирования Земли (ФФД ДЗЗ). В настоящее время комплекс АПОИ обеспечивает, в том числе, заявки федеральных и региональных органов государственной власти (Павлов и др., 2021; Шведов, 2023), а также работу системы «Цифровая Земля — Сервисы» для оперативного мониторинга и управления территориями в интересах органов государственной власти и коммерческих предприятий (Болтачёв, 2022; Натарова, 2023).

## Особенности и преимущества

При разработке комплекса АПОИ были учтены все известные недостатки и узкие места используемых, но уже технически устаревших технологий обработки информации (применяемых в отечественных НКПОР). Так, основными особенностями обработки данных ДЗЗ, реализованными в комплексе АПОИ, стали:

- унифицированная обработка данных с разной целевой аппаратуры различных КА ДЗЗ в едином комплексе;
- полная обработка от «сырого» сигнала до стандартных потребительских продуктов ДЗЗ в едином технологическом цикле;
- обработка на едином комплекте технических средств (распределённые кластерные вычисления);
- полностью автоматическая обработка без участия оператора;
- высокопроизводительная обработка в течение нескольких минут;
- автоматическая коррекция геопривязки данных ДЗЗ до единиц метров за счёт уточнения бортовой навигационной информации;
- формирование качественных стандартных информационных продуктов (со сведёнными спектральными каналами, в том числе продуктов типа BUNDLE, PANSHARP) на основе строгих и точных математических моделей съёмки;
- сокращение необходимых для обработки технических средств в десятки раз;
- масштабируемость под сколь угодно большие потоки данных.

На текущий момент комплекс АПОИ осуществляет высокоскоростную обработку больших объёмов данных ДЗЗ на вычислительном кластере, расположенном в центре обработки данных (ЦОД) АО «Российские космические системы». Обработка проводится в распределённом режиме полностью автоматически, при этом распределение обработки проходит как на уровне маршрутов съёмки — разные маршруты распределяются на разные серверы, так и в пределах маршрута — обработка распределяется сразу на несколько серверов. Такая реализация обработки позволила существенно снизить время получения готовой информационной продукции (Лошкарев и др., 2020; Павлов и др., 2021), а также намного более эффективно использовать ресурсы задействованных технических средств (требуется в десятки раз меньше «железа» чем в НКПОР).

В настоящее время комплекс АПОИ обеспечивает обработку (как оперативных, так и архивных) панхроматических и мультиспектральных данных съёмочных систем «Геотон», широкозахватного мультиспектрального съёмочного комплекса высокого/среднего разрешения (ШМСА-ВР/СР) с КА «Ресурс-П» № 1–3, данных панхроматической камеры (ПСС) и мультиспектральной (МСС) камеры КА «Канопус-В» № 1, 3–6, ИК (инфракрасный), данных съёмочных систем комплекса многозональной спутниковой съёмки (КМСС) и многоканального сканирующего устройства малого разрешения (МСУ-МР) КА «Метеор-М» № 2, 2-2. Комплекс выполняет полный цикл обработки от распаковки «сырого» сеанса съёмки (RAW) и формирования архивных продуктов уровня 0 до стандартной обработки и формирования продуктов уровня 1 и 2 (ГОСТ Р 59480-2021 «Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Уровни обработки данных дистанционного зондирования Земли из космоса», <https://files.stroyinf.ru/Data/762/76232.pdf>), поставляемых потребителям, включая ортокорректированные продукты BUNDLE и PANSHARP. Вся обработка данных ДЗЗ с различных сенсоров и КА успешно выполняется в едином технологическом цикле на едином комплекте технических средств и полностью в автоматическом режиме без участия оператора.

Параллельно запуску новых отечественных КА ДЗЗ планируется модернизация комплекса АПОИ под их обработку как для данных оптико-электронного (КА «Ресурс-П» № 4, 5; «Метеор-М» № 2-3; «Ресурс-ПМ»; «Аист-2Т»), так и радиолокационного (КА «Кондор-ФКА»; «Обзор-Р») наблюдения.

## Точностные характеристики

Реализованные в комплексе АПОИ алгоритмы (рис. 1) уточнения бортовых параметров баллистического движения КА и его ориентации (параметры внешнего ориентирования) с использованием глобального опорного покрытия обеспечили существенное улучшение качества геопривязки продуктов ДЗЗ и сведения спектральных каналов в процессе наземной обработки информации.

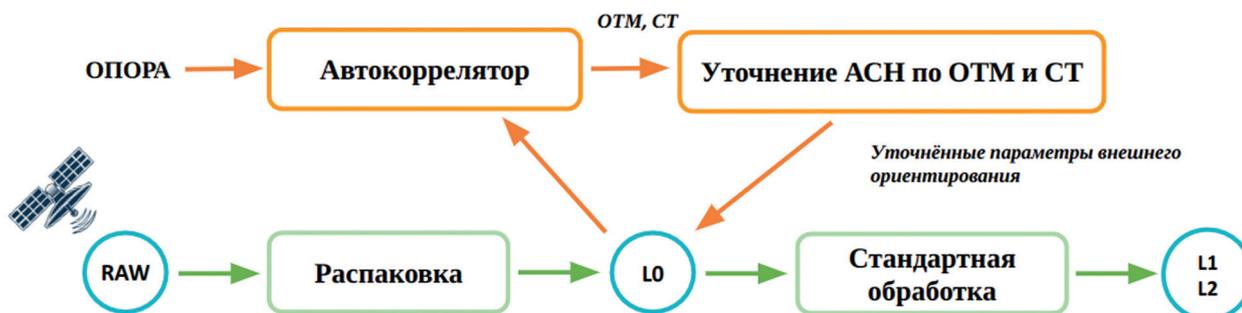


Рис. 1. Схема коррекции параметров баллистики и ориентации КА в момент съёмки: ОТМ — опорные точки местности, СТ — связующие межматричные и межканальные точки, АСН — автономная система навигации, L0, L1, L2 — уровни обработки 0, 1, 2

Разработанные алгоритмы автоматического поиска ОТМ и СТ позволяют определять сотни тысяч точек для каждого маршрута (рис. 2). В качестве опорных данных можно использовать любое покрытие, доступное по протоколам WMS/WMTS (англ. web map service / web map tile service). За счёт статистической обработки такого большого количества точек достигается не только уточнение параметров внешнего ориентирования КА, но и нивелируются искажения и неточности используемого опорного покрытия.

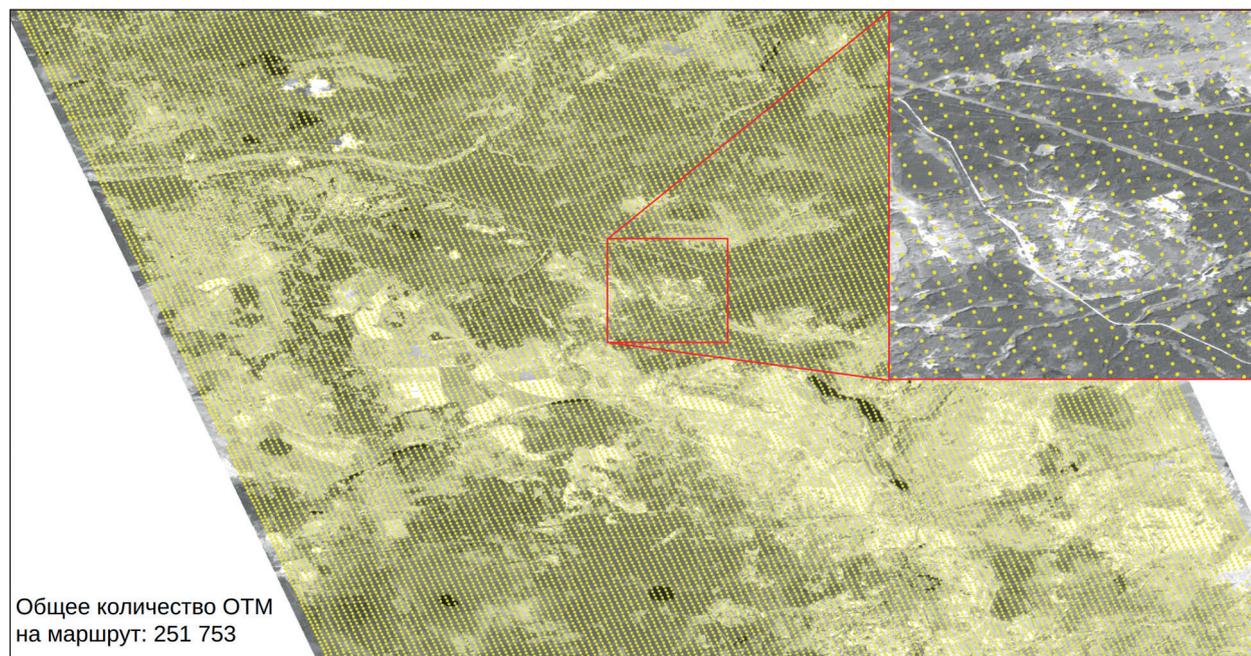


Рис. 2. Фрагмент маршрута с автоматически найденными опорными точками местности

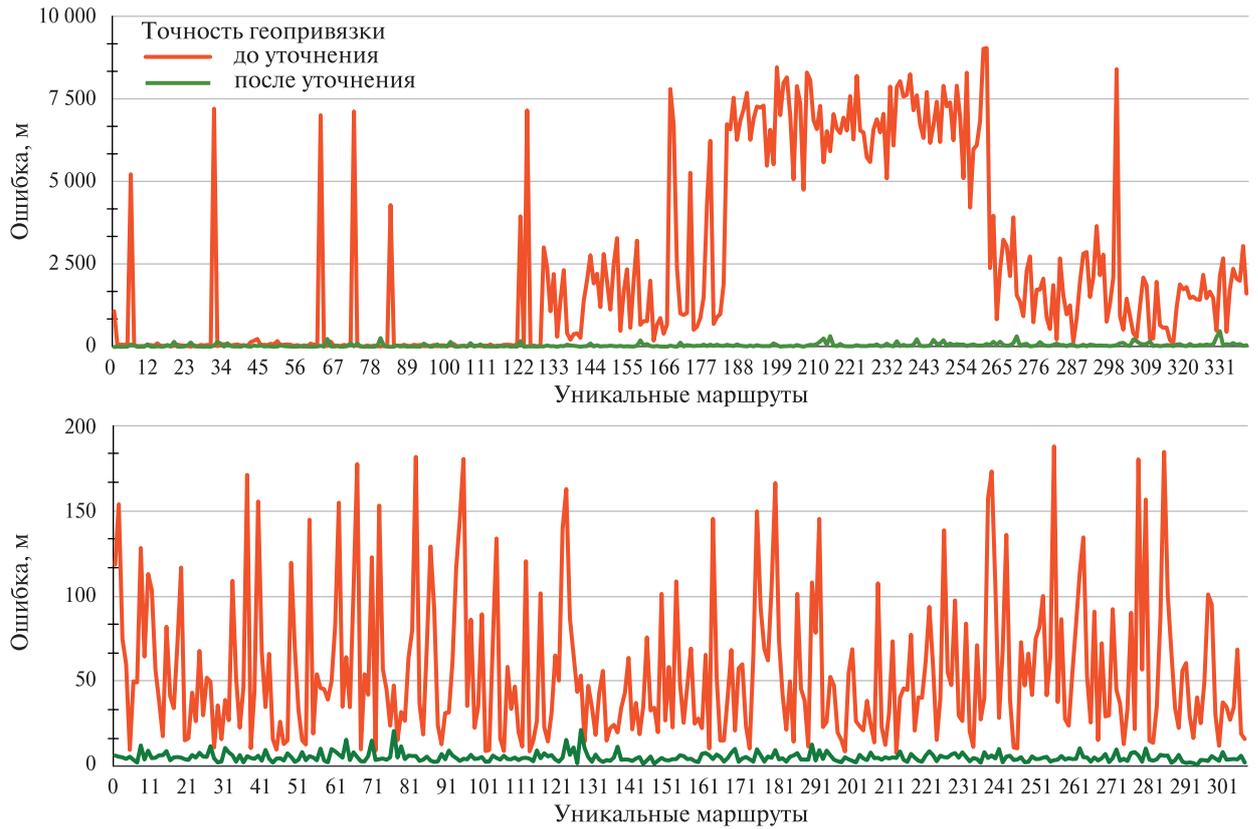


Рис. 3. Статистика уточнения геопривязки для данных КА «Канопус-В» № 1 (вверху) и «Канопус-В» ИК, № 3–6 (внизу)

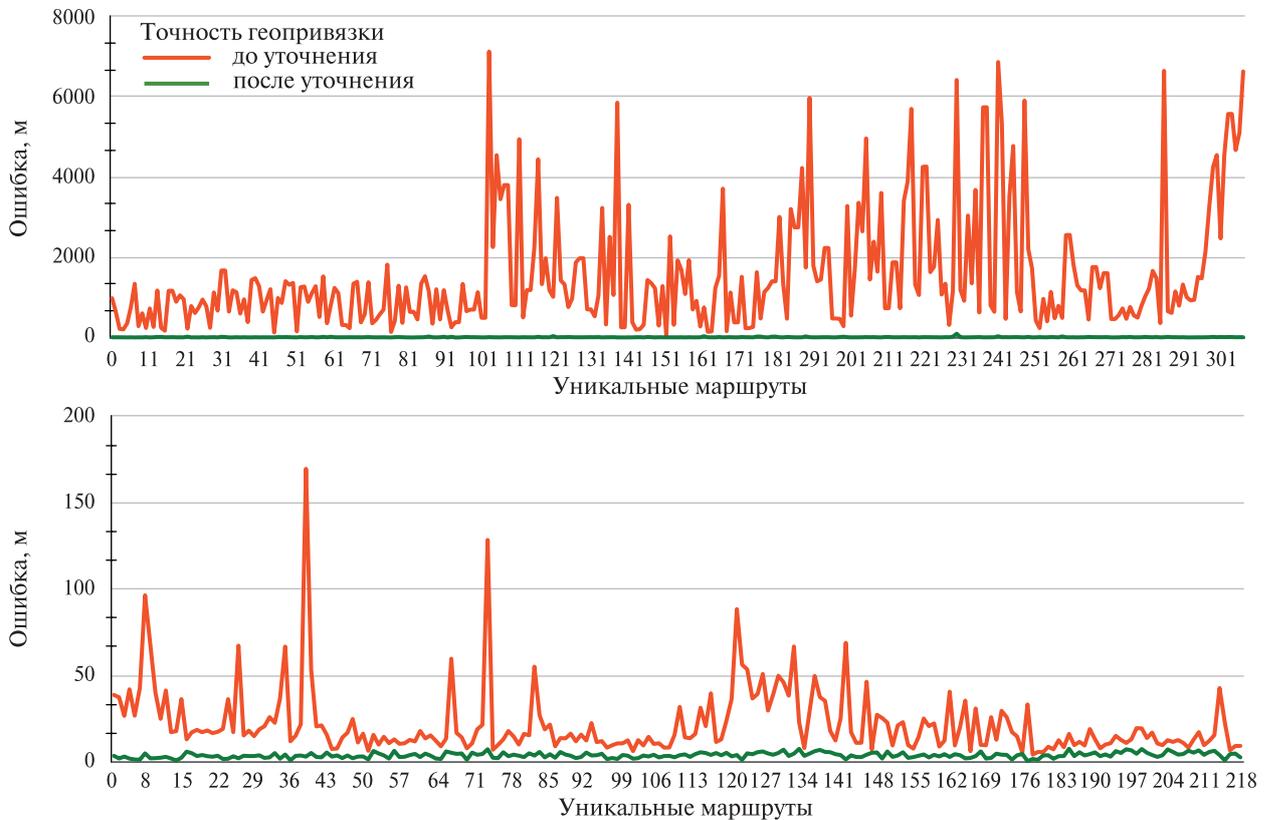


Рис. 4. Статистика уточнения геопривязки для данных аппаратуры «Геотон» КА «Ресурс-П» № 1 (вверху) и «Ресурс-П» № 2, 3 (внизу)

Согласно статистике обработки более 17 тыс. маршрутов за девятимесячный период наблюдения работы АПОИ в составе ФФД Д33, коррекция геопривязки данных приводит к улучшению точности в среднем на один-два порядка (Федоткин и др., 2022б, в, 2023а, б).

Так, например, для данных КА «Канопус-В» ИК, № 3–6 средняя точность геопривязки была улучшена с 63,4 до 5,9 м. Соответствующие результаты выборочной статистики представлены на *рис. 3, 4* (см. с. 13) (по оси *X* представлены уникальные маршруты съёмки, по оси *Y* красным цветом дана ошибка геопривязки (в метрах) по бортовым навигационным данным, зелёным цветом — ошибка геопривязки (в метрах) по автоматически уточнённым навигационным данным).

Сводная статистика по коррекции геопривязки архивных данных различных отечественных КА представлена в *табл. 1*.

Таблица 1. Статистика уточнения комплекса АПОИ

Космический аппарат	Средняя точность геопривязки до коррекции (по бортовым данным), м	Средняя точность геопривязки после коррекции (с использованием опоры), м
«Канопус-В» № 3–6, ИК	63,4	5,9
«Ресурс-П» № 2, 3 «Геотон»	22,4	4,2
«Канопус-В» № 1, БКА*	3236,0	19,4
«Ресурс-П» № 1 «Геотон»*	3823,9	7,2

\* Эти КА имели проблемы в бортовой аппаратуре (БКА — белорусский КА).

Статистика уточнения геопривязки комплексом АПОИ на многотысячной выборке архивных маршрутов на различные территории и сезоны съёмки показала, что доля успешно скорректированных в автоматическом режиме маршрутов составила 99,3 %, при этом для оставшихся 0,7 % съёмки не было выполнено уточнение по причине фактической некондиционности данных: сплошная облачность, сплошная водная поверхность, сплошной лёд (при том что эти 0,7 % данных также были успешно обработаны, но с исходной точностью бортовых данных автономной системы навигации (АСН)).

### Характеристики производительности

Комплекс АПОИ в рамках ФФД Д33 функционирует на вычислительном кластере, состоящем всего из 10 серверов без графических процессоров (CPU 2x Intel Xeon Gold 6144 3.50 GHz, RAM 769 GB, HDD 12x8 TB), размещённых в ЦОД. Стоит обратить внимание, что за год опытной эксплуатации АПОИ на фоне увеличения общего количества заявок потребителей (по причине их автоматической и более оперативной обработки) все они были выполнены всего лишь при 10%-й средней загрузке вышеупомянутого десятисерверного кластера (технология НКПОР задействовала более сотни единиц техники для аналогичной задачи). При пиковой загрузке комплекс АПОИ на приведённом выше кластере выдаёт следующие характеристики производительности (*табл. 2*).

Таблица 2. Производительность комплекса АПОИ (в сутки)

Среднее количество маршрутов	359 маршрутов (эквивалентно 4 мин на маршрут)
Среднее количество продуктов (сцен)	3346 продуктов (эквивалентно 25 с на сцену)
Средняя площадь обработанной территории	1,5 млн км <sup>2</sup>
Средний объём созданной продукции	3–7 ТБ (в зависимости от типа КА)

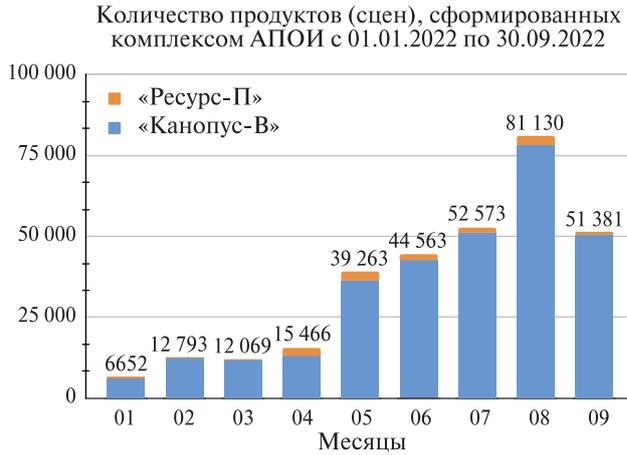


Рис. 5. Количество сцен, выданных потребителям за 9 мес наблюдения работы АПОИ в ходе эксплуатации ФФД ДЗЗ

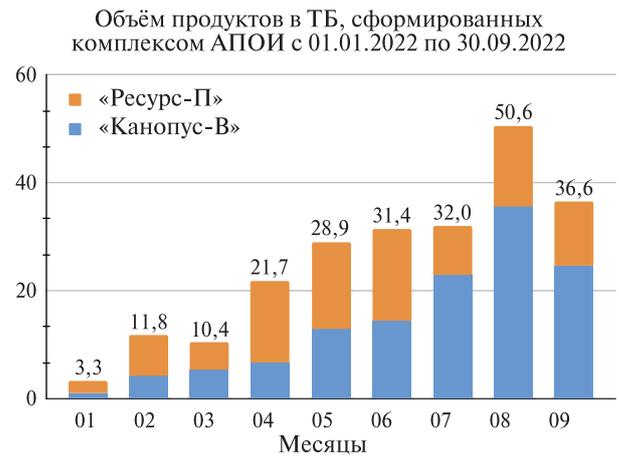


Рис. 6. Объём данных (ТБ), выданных потребителям за 9 мес наблюдения работы АПОИ в ходе эксплуатации ФФД ДЗЗ

На рис. 5, 6 представлена статистика за 9 мес наблюдения работы АПОИ в рамках ФФД ДЗЗ. За указанный период суммарно было обработано 315 890 продуктов (сцен) объёмом 226,7 ТБ.

### Технологические особенности

При создании комплекса АПОИ был решён целый ряд сложных инженерных задач, разработаны новые уникальные алгоритмы и технологии. На рис. 7 (см. с. 16) приведён пример исследования внутренней геометрии путём корреляционного совмещения двух маршрутов КА «Ресурс-П», «Геотон».

Функциональный состав комплекса АПОИ включает в себя следующие основные элементы:

- автоматическая распаковка, фильтрация и восстановление исходных «сырых» данных ДЗЗ, принимаемых с борта КА;
- построение модели баллистического движения КА;
- построение модели ориентации КА на период съёмки путём интегрирования (комплексирования) измерений различных источников ориентации и интегрирования данных измерителей угловой скорости;
- построение модели сенсора (геометрия съёмочного устройства, фокальной плоскости и др.);
- реализация алгоритмов прямой и обратной функции геопривязки на основе строгих математических моделей;
- автоматический корреляционный поиск опорных и связующих точек, их фильтрация и регуляризация;
- уточнение моделей баллистического движения и ориентации КА с использованием полученных массивов опорных и связующих точек;
- сшивка изображений отдельных матриц (линеек) фотоприёмного устройства с формированием на выходе единого изображения в геометрии псевдосенсора (в случае сложных фотоприёмных устройств, состоящих из нескольких фотоприёмных линеек или кадровых матриц ПЗС (прибор с зарядовой связью));
- субпиксельное геометрическое сведение (совмещение) между собой изображений, полученных в различных спектральных каналах целевой аппаратуры ДЗЗ из космоса;
- относительная и абсолютная радиометрическая коррекция (рис. 8, см. с. 16);
- повышение резкости изображения (рис. 9, см. с. 17);

- ортокоррекция изображений с учётом цифровой модели рельефа;
- расчёт RPC-коэффициентов;
- формирование стандартных информационных продуктов в заданной картографической проекции;
- формирование продуктов BUNDLE и PANSHARP;
- маскирование (обрезка) по контуру.

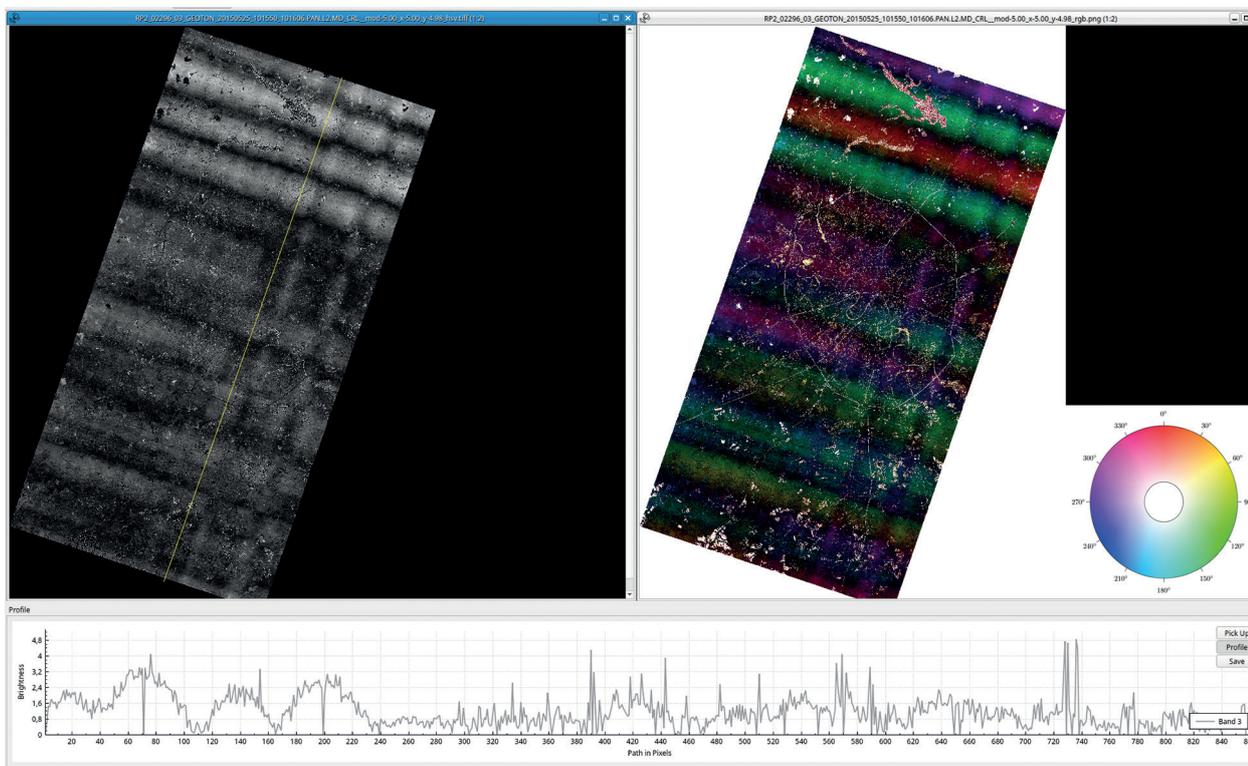


Рис. 7. Исследование влияния неточностей ориентации на параллакс при наложении двух маршрутов друг на друга (слева — яркость соответствует величине смещения, справа — цвет соответствует направлению смещения, жёлтая линия — линия профиля, внизу — график профиля)

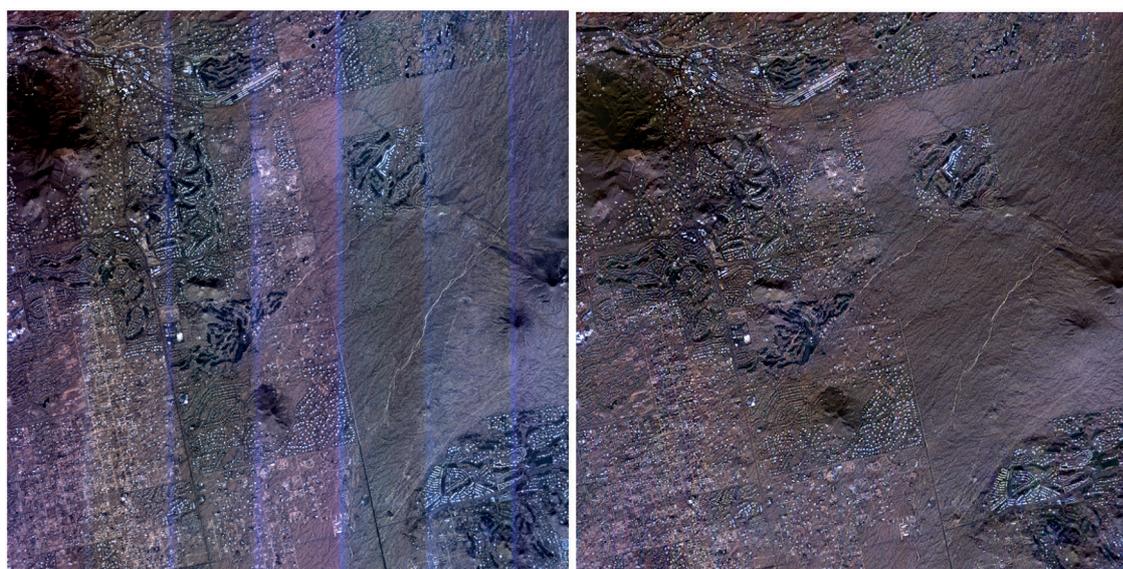


Рис. 8. Относительная радиометрическая коррекция (слева — исходное изображение, справа — изображение с проведённой относительной радиометрической коррекцией)



Рис. 9. Повышение резкости изображения (слева — исходное изображение, справа — изображение с повышенной резкостью)

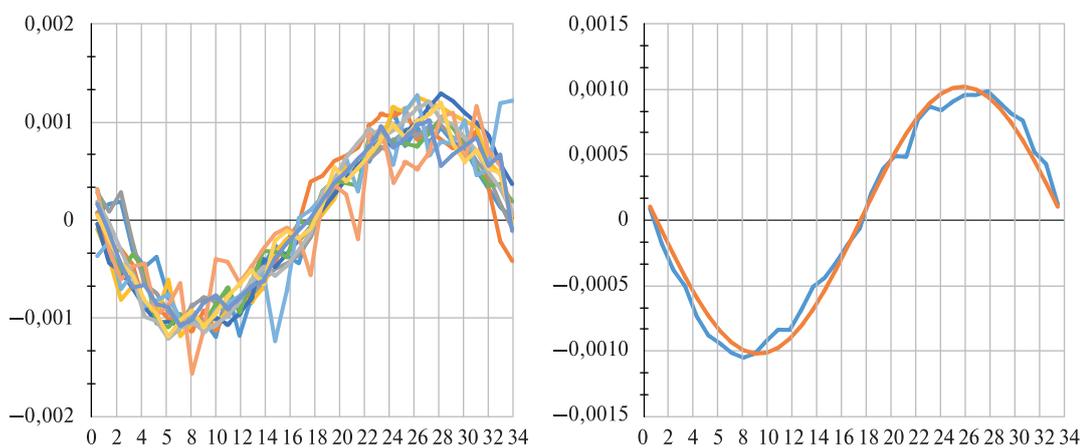


Рис. 10. Графики дисторсии (слева — рассчитанные для разных маршрутов, справа — усреднённый график дисторсии и аппроксимация)

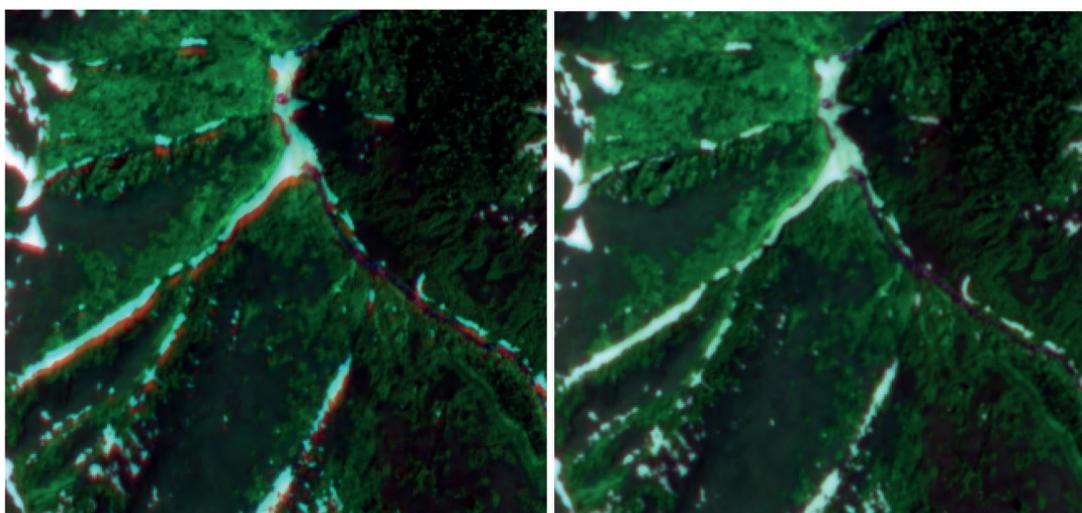


Рис. 11. Сведение каналов (слева — до коррекции дисторсии, справа — после коррекции дисторсии)

В комплексе АПОИ также реализована калибровка параметров съёмочной системы КА. Калибровка осуществляется периодически по мере необходимости вне основного потока обработки данных ДЗЗ. В результате калибровки формируются файлы служебной информации, которые в дальнейшем используются при обработке. Калибровке подлежат следующие параметры: установочные углы съёмочной системы относительно конструктивных осей КА, фокусное расстояние объектива, дисторсия объектива (рис. 10, 11, см. с. 17), смещение и угловое положение светочувствительных элементов в фокальной плоскости.

Основные отличительные особенности геометрической калибровки, реализованной в комплексе АПОИ:

- осуществляется полностью в автоматическом режиме;
- не требует использования калибровочных полигонов.

## Достигнутые результаты

Фактически, созданный комплекс АПОИ позволил перейти на качественно новый уровень в наземной обработке данных с отечественной группировки (ОГ) КА ДЗЗ:

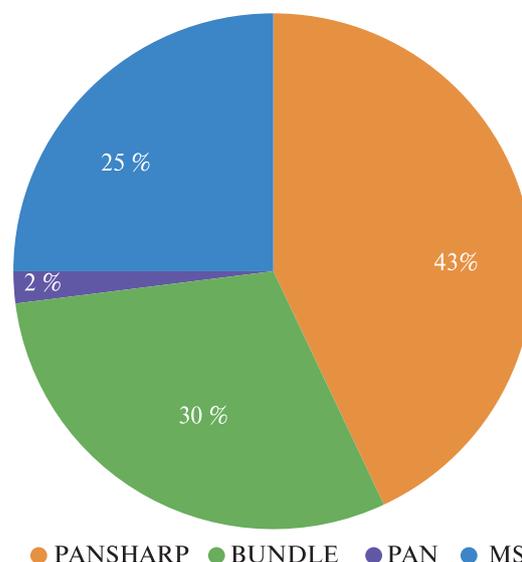
- от более полусотни задействованных в обработке операторов до полностью автоматической обработки;
- от более сотни единиц техники (преимущественно АРМ) до нескольких серверов;
- от обработки в течение нескольких часов и суток до обработки в течение нескольких минут;
- от точности геопривязки в десятки и сотни метров до единиц метров.

Помимо основных вышеперечисленных преимуществ технологии АПОИ над технологиями, используемыми в НКПОР, нельзя не отметить и другие немаловажные результаты. С началом эксплуатации АПОИ российские потребители впервые получили возможность в автоматическом режиме оперативно в больших объёмах и на значительные территории получать:

- мультиспектральные продукты с качественно сведёнными спектральными каналами;
- продукты BUNDLE, в которых геометрически сведены спектральные каналы не только между собой, но и с каналом панхроматической съёмки;
- продукты PANSHARP как в уровне L1 (Basic), так и в уровне L2 (Ortho Ready, Ortho);
- расширенный состав продуктов (включающий, в том числе, маски качества, облаков и подстилающей поверхности);
- расширенный состав метаданных продуктов по стандарту OGC (англ. Open Geospatial Consortium);
- более высокое качество внутренней геометрии продуктов за счёт применения более строгих математических моделей обработки (Федоткин и др., 2022а).

Доказательством востребованности и эффективности технологий АПОИ служит многократно увеличенный спрос на отечественные данные ДЗЗ со стороны российских потребителей с момента начала эксплуатации ФФД ДЗЗ, функционирующего на базе обработки АПОИ.

Рис. 12. Соотношение типов продуктов, заказанных потребителям за 9 мес наблюдения работы АПОИ в ходе эксплуатации ФФД ДЗЗ с 01.01.2022 по 30.09.2022



При этом, как показала статистика (рис. 12, см. с. 18), наиболее востребованными стали продукты BUNDLE и PANSHARP (суммарно 73 % заявок), которые практически не создавались ранее для потребителей средствами НКПОР ввиду существенной трудоёмкости ручной обработки и огромных временных затрат на это.

### От снимка к покрытию

В конечном счёте именно технические и алгоритмические подходы, реализованные в комплексе АПОИ, позволили сделать технологический скачок и впервые обеспечить полностью автоматическую высокопроизводительную и высококачественную обработку данных с российской ОГ КА ДЗЗ высокого и среднего разрешения («Ресурс-П», «Канопус-В», «Метеор-М»). Именно благодаря АПОИ удалось обеспечить полностью автоматический (безоператорный) цикл обработки данных от заявок потребителей в геопортале до выгрузки им готовой продукции ДЗЗ в рамках работы с ФФД ДЗЗ.

Вышеописанный технологический задел комплекса АПОИ, основанный на строгих математических моделях съёмки, послужил алгоритмическим ядром Информационной системы «Цифровая Земля», в которой, помимо автоматического формирования высококачественных стандартных продуктов ДЗЗ, впервые реализована оперативная автоматическая обработка всего архива данных российской ОГ КА ДЗЗ как единого сплошного многослойного динамического покрытия (ЕСМДП) с возможностью автоматического формирования в интересах потребителей высокоточных ортофотопокрытий (мозаик) и безоблачных композитов.

С 2019 г. коллектив разработчиков комплекса АПОИ в рамках ОКР «Цифровая Земля — Покрытие» по заказу ГК «Роскосмос» ведёт работы по созданию подсистемы обработки данных информационной системы «Цифровая Земля» (ПОД ИС ЦЗ), которая предназначена для высокоскоростной обработки в автоматическом режиме всего архива данных российской ОГ КА ДЗЗ как ЕСМДП. При этом подсистема проектируется таким образом, чтобы «сырая» оперативная информация, поступающая с антенных систем в виде сеансов съёмки, также обрабатывалась в автоматическом режиме и становилась частью ЕСМДП, тем самым, непрерывно обновляя его.

### Автоматическое создание ортомозаик

В ПОД ИС ЦЗ помимо прочего реализована уникальная, не имеющая аналогов в России технология полностью автоматического формирования в интересах потребителей производных продуктов уровня 3 — высококачественных бесшовных покрытий (ортомозаик) с точностью геопривязки до единиц метров (Федоткин и др., 2023а, б).

На рис. 13 (см. с. 20) представлен пример автоматического формирования мозаик на следующие субъекты РФ: Кемеровская обл., Кабардино-Балкарская Республика, Ивановская обл., Республика Хакасия, Еврейская автономная обл., Калининградская обл.

При реализации программного обеспечения автоматического построения ортомозаик были решены следующие основные задачи:

- построение ортомозаик по строгим моделям с точностью геопривязки до единиц метров (для данных высокого разрешения «Канопус-В» и сверхвысокого разрешения «Ресурс-П» получена средняя точность геопривязки 2–3 м);
- блочное уравнивание отдельных маршрутов между собой с точностью до долей пикселя параметрами строгих моделей съёмки;
- семантическая сегментация с использованием искусственных нейронных сетей (рис. 14, см. с. 20), которая позволяет определять маски облачности, воды, леса, застройки, детектировать дефекты на снимках — всё это участвует в фильтрации опорных и связующих точек, а также позволяет по заданным пользователем критериям и оценкам качества выбирать наиболее подходящие маршруты для ортомозаики;

- тональная радиометрическая балансировка маршрутов при построении ортомозаики;
- построение оптимальных линий «пореза» между маршрутами в ортомозаике;
- генерация ортокорректированных с учётом рельефа мозаик как из одноканальных продуктов панхроматической съёмки, так и мультиспектральных данных, а также создание ортомозаик типа PANSHARP.

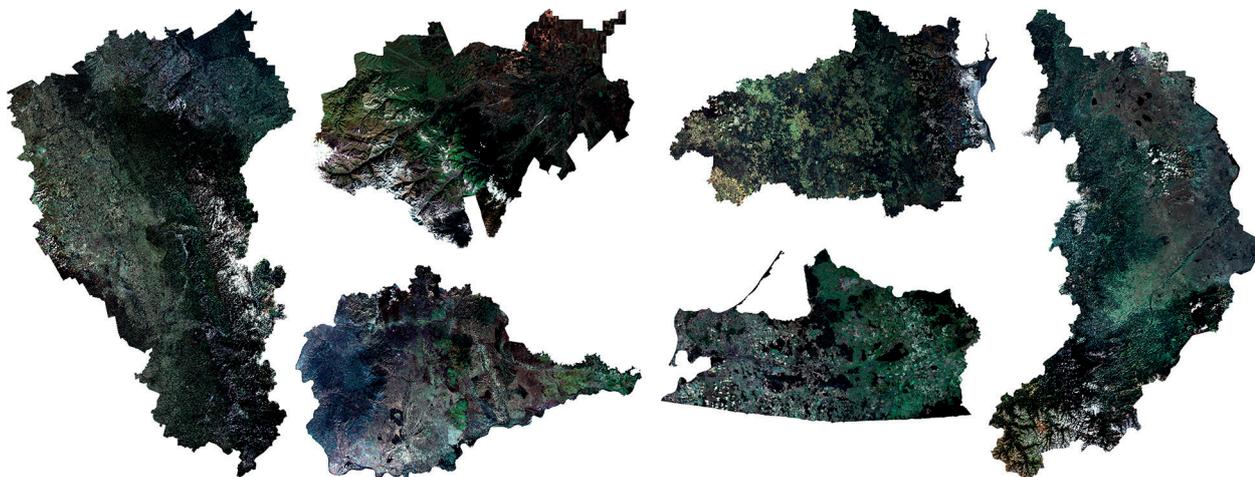


Рис. 13. Пример бесшовных ортомозаик (результат объединения нескольких снимков поверхности Земли в одно непрерывное тонально сбалансированное изображение большой площади), созданных в автоматическом режиме в ПОД ИС ЦЗ

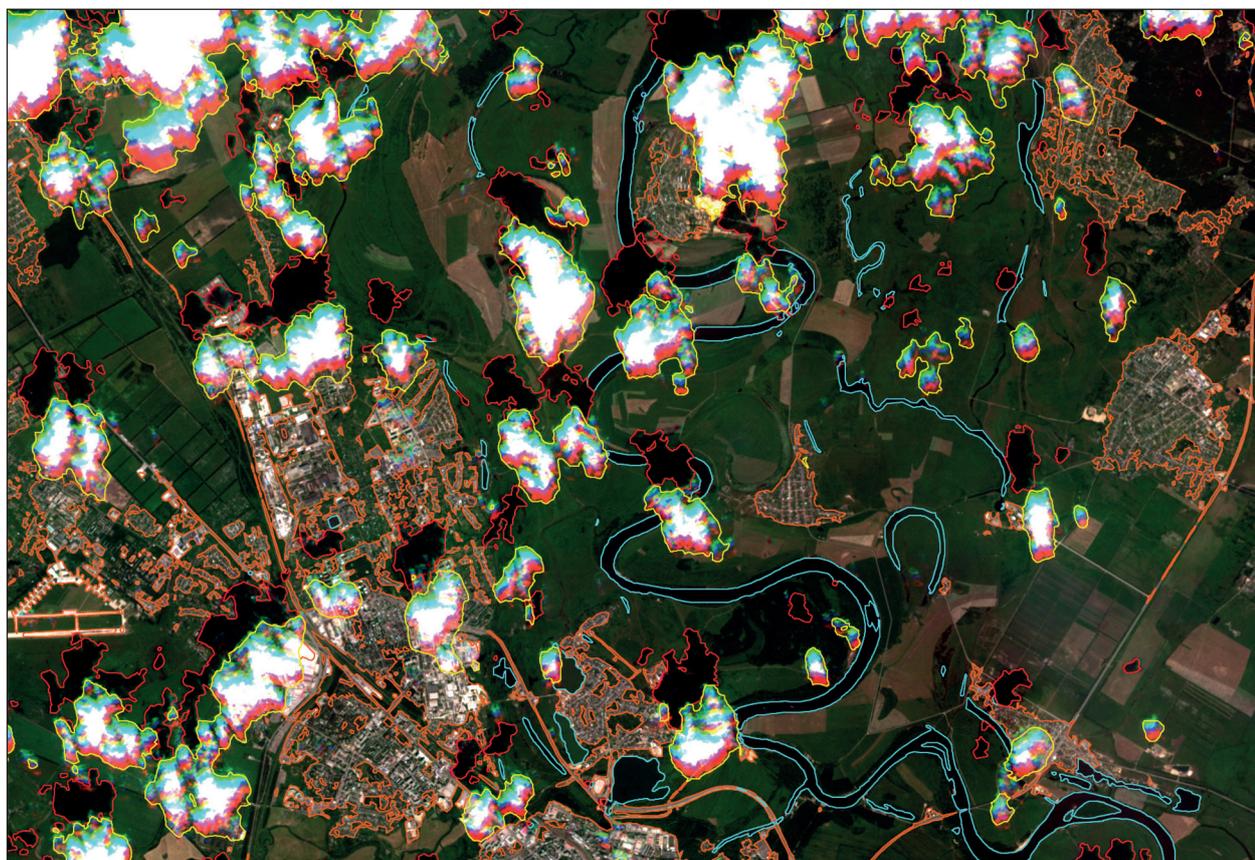


Рис. 14. Семантическая сегментация искусственными нейронными сетями. Автоматически выделены следующие классы: облака, водные объекты, городская застройка, тени

Основные отличительные особенности генерации ортомозаик, реализованных в ПОД ИС ЦЗ следующие:

- полностью автоматическое создание ортомозаик от подбора маршрутов по заданным критериям потребителя до автоматической тональной балансировки и построение линий пореза (рис. 15);
- использование строгих математических моделей на всех этапах создания ортомозаик, включая блочное уравнивание по строгим моделям съёмки.

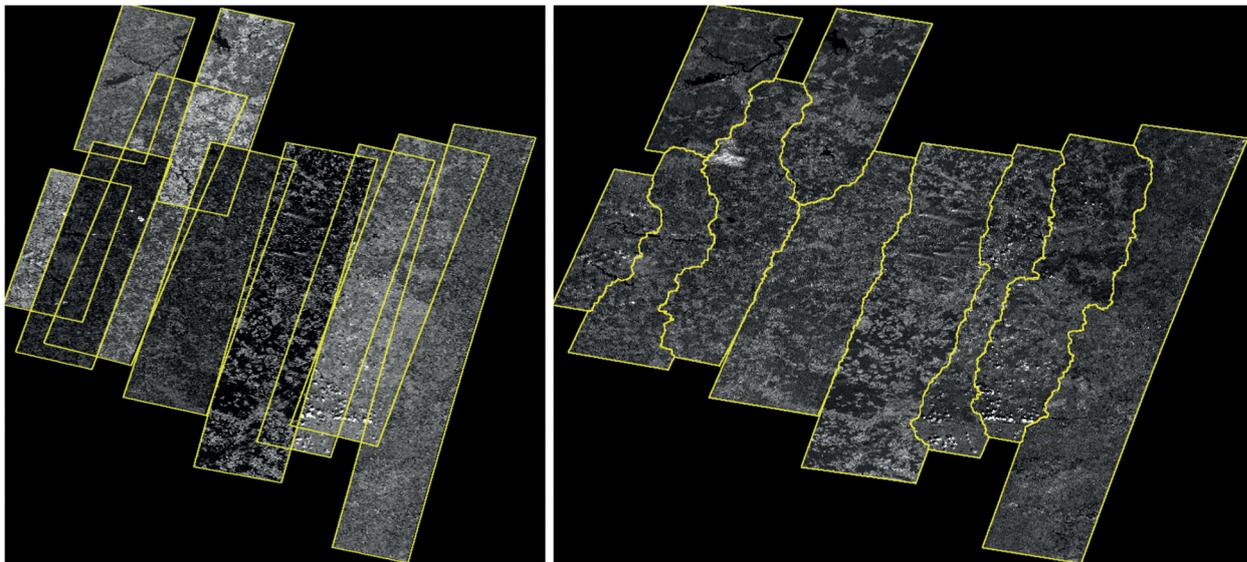


Рис. 15. Пример результата автоматического подбора снимков с перекрытием для построения мозаики (слева) и пример автоматической тональной балансировки с проведением линий порезов (справа)

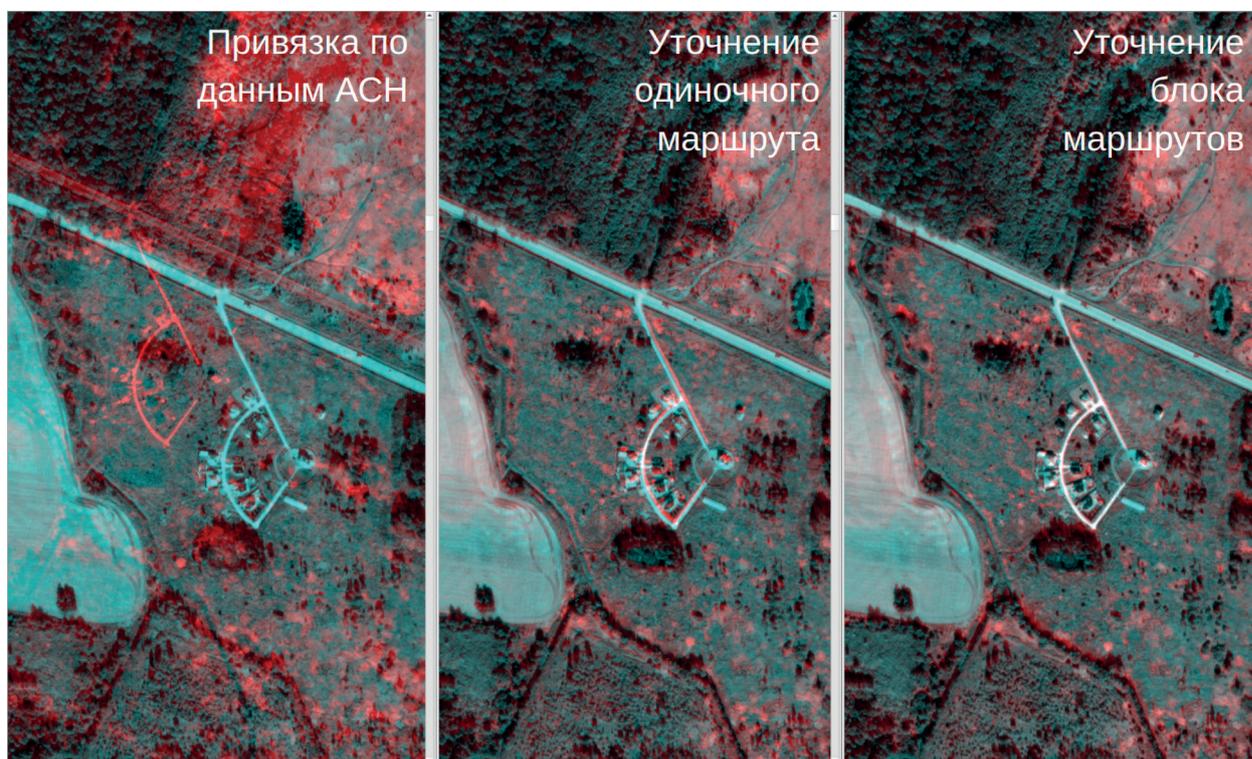


Рис. 16. Пример двухэтапной коррекции геопривязки

При создании ортомозаик высокая точность геопривязки данных обеспечивается автоматически в два этапа:

- коррекция геопривязки отдельных маршрутов путём уточнения параметров строгой модели съёмки (коррекция измерительной информации, поступающей с борта КА, — линейного и углового положения КА в каждый момент времени) с точностью до единиц метров за счёт использования опорной информации;
- коррекция геопривязки всего блока маршрутов мозаики (блочное уравнивание) при которой также происходит уточнение параметров строгих моделей съёмки всех маршрутов (для обеспечения их шивки между собой с пиксельной точностью) за счёт совместной обработки маршрутов (рис. 16, см. с. 21).

Для коррекции геопривязки в ПОД ИС ЦЗ используется собственная глобальная опора, размещённая на технических средствах ИС ЦЗ. Характеристики опоры (разрешение 1,2 м и средняя ошибка не более 4,5 м на всю территорию земного шара) позволяют искать опорные точки как для данных среднего и высокого, так и сверхвысокого разрешения.

### Первые результаты

При построении бесшовной ортомозаики площадью 27 тыс. км<sup>2</sup> на территорию п-ова Крым был задействован макет подсистемы обработки данных информационной системы «Цифровая Земля» и Федеральный фонд данных ДЗЗ. Время автоматического создания данной ортомозаики составило около 2 ч. Выбор п-ова Крым в качестве региона для отработки алгоритмов автоматического формирования ортомозаик и анализа их точностных характеристик обусловлен разнородностью и сложностью территории (равнины и горы, городская застройка, обширные сельхозугодия и лесные массивы, наличие морской береговой линии — всё это факторы, усложняющие обработку).

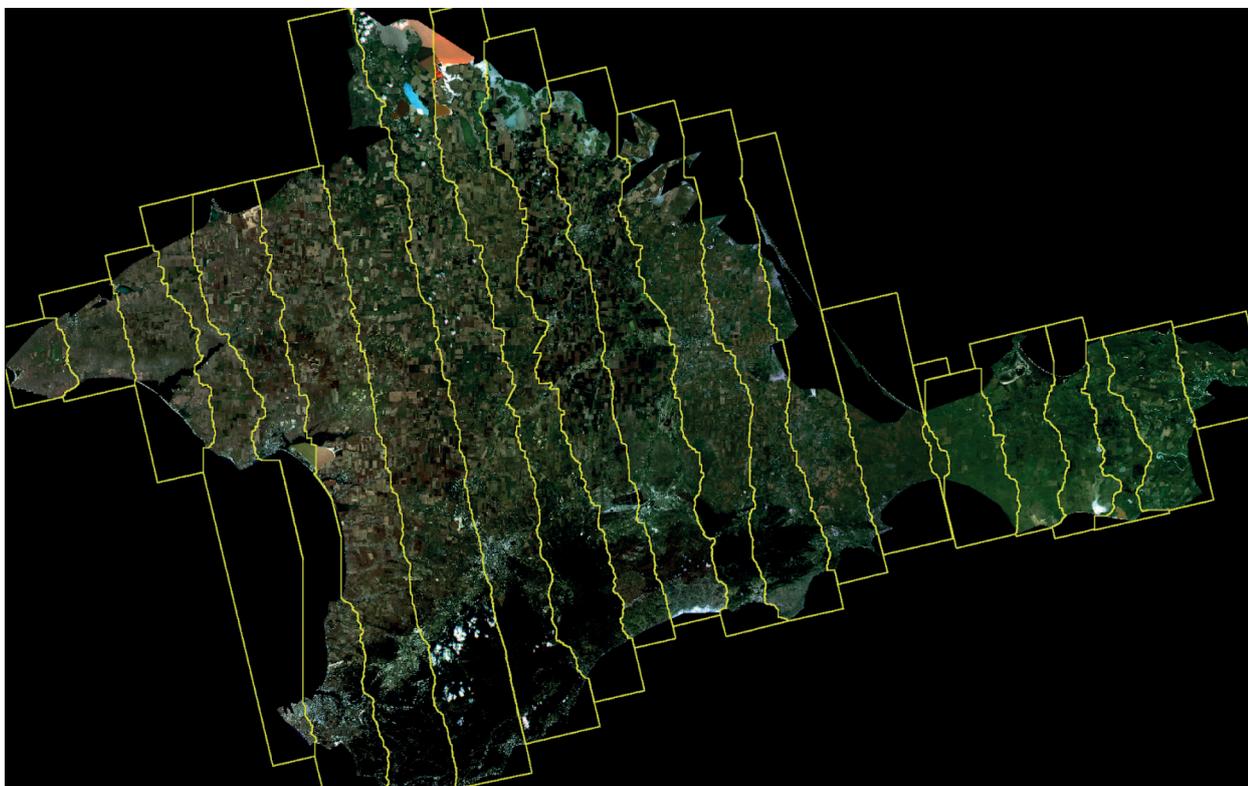


Рис. 17. Автоматически построенная ортомозаика PANSHARP на республику Крым по данным КА «Канопус-В» и векторный слой линий пореза

На *рис. 17* (см. с. 22) представлена результирующая ортомозаика из 22 маршрутов с КА «Канопус-В» с комбинацией каналов PANSHARP. Наиболее подходящие маршруты по заданному набору критериев для построения мозаики (сезонность, облачность, качество) были отобраны и обработаны в автоматическом режиме из более чем 700 маршрутов различных КА серии «Канопус-В», находящихся в ФФД ДЗЗ. Данные АСН маршрутов были скорректированы в автоматическом режиме. При создании мозаики все операции выполнялись без участия оператора: отбор и предварительная обработка маршрутов, набор опорных и связующих точек, блочное уравнивание маршрутов относительно друг друга, фотометрическое выравнивание, а также построение линий пореза.

В процессе автоматического создания ортомозаики использовалось опорное покрытие с пространственным разрешением 1,2 м и средней ошибкой геодезической привязки 4,5 м.

## Анализ точности

Анализ точности геопривязки ортомозаики на Крым проводился двумя способами:

- 1) автоматическими алгоритмами относительно опорного покрытия в процессе создания ортомозаики;
- 2) ручным способом профессиональными фотограмметристами относительно опорного покрытия и относительно высокоточных опорных точек местности, полученных с помощью геодезических GPS-измерений (*англ.* Global Positioning System — американская система глобального позиционирования) с погрешностью не более 0,5 м.

Средняя точность геопривязки рассчитывалась по формуле средней абсолютной ошибки MAE (*англ.* Mean Absolute Error):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}}{n}.$$

Из *табл. 3*, в которой приведены основные статистические показатели автоматического анализа точности геопривязки созданной ортомозаики относительно используемого опорного покрытия, видно:

- что исходная средняя точность геопривязки по бортовым данным АСН составила более 40 м (для архивных маршрутов, участвовавших в создании ортомозаики);
- результирующая средняя точность геопривязки по всему полю созданной ортомозаики составила 1,98 м (при пространственном разрешении ортомозаики 2,1 м);
- общее количество опорных точек, участвовавших в автоматическом расчёте точности геопривязки относительно опорного покрытия, составило около 300 тыс. Равномерное расположение такого количества точек по всей площади ортомозаики является хорошим статистическим показателем достоверности полученных оценок точности.

Маршруты между собой в мозаике совмещены с пиксельной точностью (*рис. 18*, см. с. 25).

Для фотограмметрического анализа точности геопривязки относительно опорного покрытия ручным способом были проведены 208 измерений равномерно по всей ортомозаике (*рис. 19*, см. с. 25). Средняя ошибка составила 4,17 м.

Отличие оценок точности средней ошибки геопривязки автоматическими корреляционными методами (1,98 м, что эквивалентно 0,94 пикселя) и ручным «сколом» точек (4,17 м, что эквивалентно 1,98 пикселя) скорее всего объясняется тем фактом, что при автоматическом корреляционном поиске точек имеем субпиксельную точность определения координат, а при ручном «сколе» точек экспертом точность не превышает 1 пикселя.

Для анализа геопривязки ручным фотограмметрическим способом относительно высокоточных наземных опорных точек были проведены 98 измерений. Средняя ошибка составила 2,54 м.

Таблица 3. Статистика геопривязки (средняя ошибка в метрах) по бортовым данным АСН после коррекции по строгим моделям и после блочного уравнивания

Идентификатор маршрута	Количество опорных точек	Средняя геопривязка		
		по данным АСН	после коррекции	после блочного уравнивания
KV3_12438_09706-00_20200430_084210	11 518	24,09	0,86	1,98
KV3_19650_16138-00_20210818_083357	4 958	5,74	1,58	2,15
KV3_19817_16288-00_20210829_082956	9 476	16,05	2,31	1,91
KV3_24009_22231-00_20220601_083216	10 588	4,18	2,06	1,19
KV4_14337_10639-00_20200902_083038	7 966	67,71	1,86	1,94
KV4_18057_13849-00_20210505_083741	15 934	61,89	3,25	3,36
KV5_03907_02993-02_20190910_084422	8 420	106,01	3,91	1,15
KV5_13001_10286-00_20210501_083316	18 214	66,23	2,33	2,18
KV6_14201_11258-00_20210719_083010	6 390	53,58	2,92	1,59
KV6_14277_11318-00_20210724_083802	24 192	40,43	2,21	2,73
KV6_14353_11386-00_20210729_084446	18 780	25,86	2,11	1,81
KVI_10659_07295-01_20190616_083717	24 670	26,31	3,27	1,65
KVI_10826_07421-01_20190627_083838	20 188	9,78	1,88	1,84
KVI_10917_07470-02_20190703_083049	4 082	14,01	1,78	0,84
KVI_16367_12027-00_20200626_082852	26 726	90,79	4,57	2,53
KVI_16534_12162-00_20200707_082849	19 312	50,94	3,49	2,49
KVI_16610_12219-00_20200712_083715	22 934	37,05	2,33	2,91
KVI_21666_16522-00_20210610_083318	3 258	43,27	2,19	1,54
KVI_21818_16651-00_20210620_084724	1 718	46,49	0,91	1,94
KVI_22228_17007-00_20210717_084657	2 1604	47,21	3,97	2,64
KVI_22243_17019-00_20210718_082936	6 892	54,57	1,56	1,49
KVI_23048_17749-00_20210909_084512	11 600	57,96	1,15	1,74
<b>Средняя геопривязка</b>		<b>43,19</b>	<b>2,39</b>	<b>1,98</b>
<b>Суммарное количество опорных точек</b>	<b>299 420</b>			

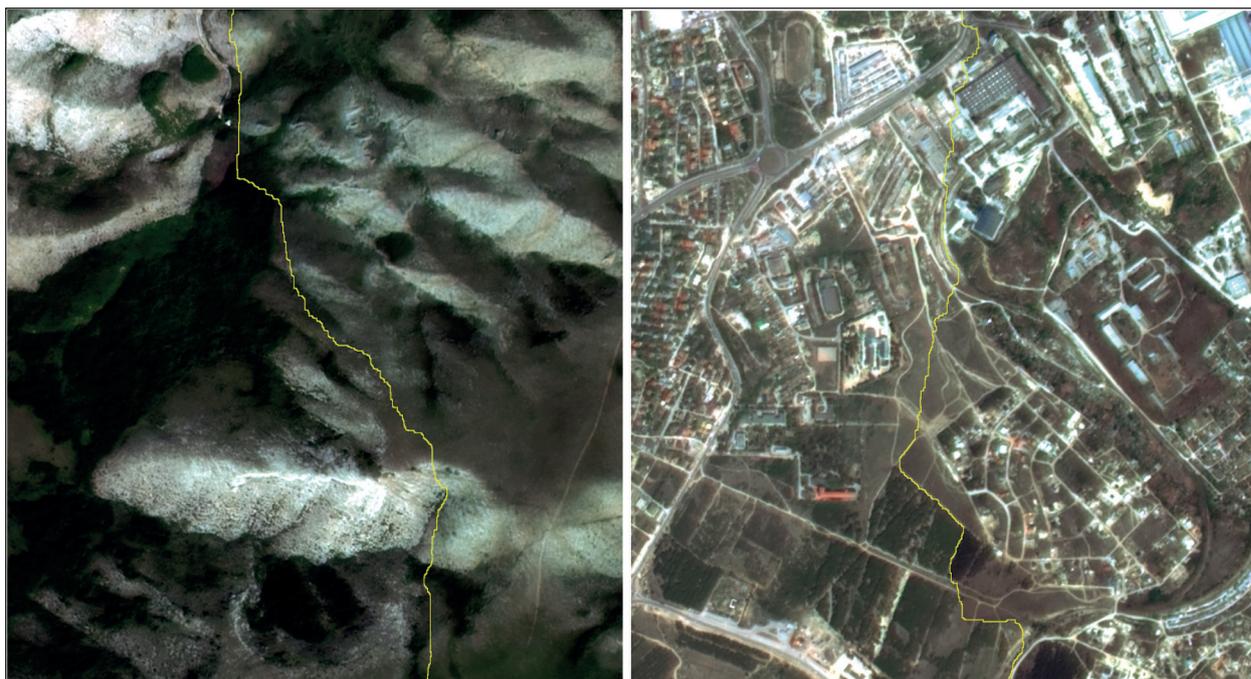


Рис. 18. Примеры бесшовного стыка между двумя маршрутами в мозаике в масштабе 1:1 (линия пореза отображена жёлтым цветом)



Рис. 19. Расположение контрольных точек на ортомозаике к опорным данным (контрольные точки отображены жёлтым цветом)

Таким образом, измеренная ручным способом точность геопривязки ортомозаики к наземным ОТМ (2,54 м, что эквивалентно 1,21 пикселя) оказалась почти вдвое выше, чем к опорному покрытию, используемому для коррекции геопривязки (4,17 м, что эквивалентно

1,98 пикселя). А учитывая вышеописанный факт, что ручное определение точности даёт вдвое большую оценку ошибки чем при автоматическом способе, имеются основания полагать, что реальная точность геопривязки ортомозаики к точкам на Земле скорее всего лучше, чем пространственное разрешение ортомозаики (1 пиксель = 2,1 м).

Стоит также обратить внимание, что полученные экспертами оценки точности ортомозаики по отношению к наземным ОТМ (2,54 м) оказались почти вдвое выше заявленной точности используемого опорного покрытия (4,5 м). Это объясняется тем, что в процессе блочного уравнивания в мозаике, несмотря на то что съём точек проводился по опорному покрытию (имеющему свои ошибки), коррекция геопривязки маршрутов выполнялась исключительно по строгим математическим моделям съёмки (баллистического движения КА, ориентации КА в момент съёмки, модели съёмочного сенсора), сохраняя корректную внутреннюю геометрию маршрутов, а не выполняя их «подтягивание» к опоре (по типу «резинового листа»). Это позволило при создании ортомозаики обеспечить «игнорирование» локальных ошибок опоры.

Полученные в результате анализа высокие показатели точности подтвердили и даже превзошли ожидания разработчиков (достигается точность геопривязки на уровне пространственного разрешения данных). Созданное программное обеспечение позволит оперативно и, главное, полностью в автоматическом режиме создавать бесшовные ортомозаичные покрытия на большие территории по данным оптико-электронной съёмки в интересах потребителей как в рамках создаваемой информационной системы «Цифровая Земля», так и в перспективных проектах. Это, безусловно, является значимым шагом в развитии наземного сегмента российского ДЗЗ для массовой потоковой обработки огромных объёмов информации, планируемой к получению в соответствии с заданным государством направлением на создание отечественной многоспутниковой группировки с сотнями космических аппаратов на орбите.

## Выводы

Таким образом, за последние несколько лет произошёл качественный переход на новый уровень автоматизации в наземной обработке данных с отечественной орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (ОГ КА ДЗЗ):

- в рамках опытно-конструкторских работ «Единая территориально-распределённая информационная система дистанционного зондирования Земли» (ЕТРИС ДЗЗ) и «Цифровая Земля — Покрытие» создано новое программное обеспечение (комплекс автоматической потоковой обработки информации (АПОИ) и подсистема обработки данных информационной системы (ПОД ИС ЦЗ)) для потоковой обработки данных ДЗЗ, функционирующее полностью в автоматическом (безоператорном) режиме;
- комплекс АПОИ обеспечивает автоматическую обработку заявок потребителей (в том числе органов федеральной и региональной власти) при работе с Федеральным фондом данных ДЗЗ, формируя качественные стандартные подукты уровней 1 и 2;
- ПОД ИС ЦЗ обеспечивает автоматическую обработку данных и представляется ключевым элементом функционирования информационной системы «Цифровая Земля», обеспечивая формирование по заявкам потребителей ещё и производных продуктов уровня 3 (бесшовных ортомозаик).

Появление данных автоматических комплексов позволило существенно повысить оперативность обработки информации в отечественном наземном сегменте ДЗЗ, снизить эксплуатационные затраты и значительно улучшить качество результирующих продуктов, тем самым обеспечив возможность эффективного использования отечественных данных ДЗЗ и реализации на их основе различных тематических сервисов.

Разработанные комплексы легко адаптируемы под новые источники информации ДЗЗ и легко масштабируемы под сколь угодно большие потоки данных, что позволяет использовать их при построении современных наземных сегментов для многоспутниковых разнотипных группировок космических аппаратов ДЗЗ.

## Литература

1. *Болтачёв М. Н.* Предоставление региональным потребителям информационных продуктов посредством комплекса «Цифровая Земля – Сервисы» // Материалы 2-й совместной Международ. научно-техн. конф. «Цифровая реальность: косм. и пространственные данные, технологии обработки». 2022. <https://conf.racurs.ru/upload/2022/Ppt/БОЛТАЧЕВ.pdf>.
2. *Боровенский Е. Н., Сысенко Д. В., Федоткин Д. И., Ядыкин А. В.* ЕТРИС ДЗЗ: автоматический комплекс потоковой обработки информации (АПОИ) как действующая альтернатива НКПОР и основа федерального фонда данных ДЗЗ // Материалы 11-й Международ. научно-техн. конф. «Актуальные проблемы создания косм. систем дистанц. зондирования Земли». 2023. С. 109–118. [https://www.vniem.ru/ru/uploads/files/conferences/231010/sbornik\\_tezisov\\_2023.pdf](https://www.vniem.ru/ru/uploads/files/conferences/231010/sbornik_tezisov_2023.pdf).
3. *Кушнырь О. В.* Возможности Российской космической системы ДЗЗ для решения социально-экономических задач // Материалы 8-й Международ. научно-практ. конф. «Геодезия. Маркшейдерия. Аэросъёмка. На рубеже веков». 2017. <https://con-fig.com/wp-content/uploads/2018/11/kushnyr.pdf>.
4. *Лошкарёв П. А., Федоткин Д. И., Боровенский Е. Н., Сысенко Д. В., Ядыкин А. В.* Практические результаты эксплуатации автоматической технологии обработки данных — качественно новые возможности и перспективы для функционирования Фонда данных ДЗЗ и создаваемой информационной системы «Цифровая Земля» // Материалы 18-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2020. С. 436. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
5. *Натарова Е. В.* О практических результатах реализации проекта «Цифровая Земля» в рамках национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» в пилотных регионах Российской Федерации // Материалы 6-го заседания МВК РКД. Тула. 2023. [https://www.roscosmos.ru/media/files/2023/July/6%20MVK%20RKD/11\\_0\\_natarova\\_terrateh.pdf](https://www.roscosmos.ru/media/files/2023/July/6%20MVK%20RKD/11_0_natarova_terrateh.pdf).
6. *Павлов А. В., Никитин И. А., Гронь А. В., Головина Т. Ю.* Федеральный фонд данных ДЗЗ из космоса. Особенности предоставления данных ДЗЗ физическим и юридическим лицам: Приложение // Дистанц. зондирование Земли из космоса: сб. информац. материалов. 2021. № 18(77). С. 43–51. <https://www.roscosmos.ru/media/files/2022/Dec/18..77..10.21.pdf>.
7. *Ромашкин В. В., Лошкарёв П. А., Федоткин Д. И. и др.* ЕТРИС ДЗЗ — современные решения в развитии отечественной наземной космической инфраструктуры дистанционного зондирования Земли из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 220–227. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-220-227.
8. *Федоткин Д. И., Тохиян О. О.* Перспективные подходы к построению комплексов обработки данных // Дистанционное зондирование Земли из космоса в России: сб. информац. материалов. 2018. № 1. С. 34–43. <https://www.roscosmos.ru/media/pdf/dzz/dzz-2018-01.pdf>.
9. *Федоткин Д. И., Боровенский Е. Н., Сысенко Д. В., Ядыкин А. В.* (2022a) Комплекс автоматической потоковой обработки информации — результаты эксплуатации в интересах потребителей Федерального фонда данных дистанционного зондирования Земли (ФФД ДЗЗ) // Материалы 20-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2022. С. 72. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
10. *Федоткин Д. И., Ядыкин А. В., Боровенский Е. Н., Сысенко Д. В.* (2022b) Результаты эксплуатации комплекса автоматической потоковой обработки информации в интересах потребителей федерального фонда данных дистанционного зондирования Земли РФ // Материалы 10-й Международной научно-техн. конф. «Актуальные проблемы создания косм. систем дистанц. зондирования Земли». 2022. С. 139–143. [https://www.vniem.ru/ru/uploads/files/conferences/220929/materialy\\_2022.pdf](https://www.vniem.ru/ru/uploads/files/conferences/220929/materialy_2022.pdf).
11. *Федоткин Д. И., Боровенский Е. Н., Сысенко Д. В., Ядыкин А. В.* (2022в) Комплекс автоматической потоковой обработки информации (АПОИ) — новый уровень скорости и качества обработки данных ДЗЗ // Материалы 20-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2022. С. 73. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
12. *Федоткин Д. И., Боровенский Е. Н., Сысенко Д. В., Ядыкин А. В.* (2023a) Программные комплексы и технологии автоматической обработки космической съёмки обеспечивающие работу федерального фонда данных ДЗЗ // Материалы 3-й Совместной междунард. научно-техн. конф. «Цифровая реальность: косм. и пространственные данные, технологии обработки». 2023. С. 8–16. [https://conf.racurs.ru/upload/2023/Materials23\\_www.pdf](https://conf.racurs.ru/upload/2023/Materials23_www.pdf).
13. *Федоткин Д. И., Боровенский Е. Н., Сысенко Д. В., Ядыкин А. В.* (2023б) Автоматическая обработка данных космической съёмки в наземном сегменте отечественной многоспутниковой группировки КА ДЗЗ // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2023. С. 58. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a.

14. Шведов Д. О. Об обеспечении потребителей данными из Федерального фонда данных ДЗЗ в 2022 году // Материалы 6-го заседания МВК РКД. Тула. 2023. [https://www.roscosmos.ru/media/files/2023/July/6%20MVK%20RKD/10\\_4\\_svedov\\_roskosmos.pdf](https://www.roscosmos.ru/media/files/2023/July/6%20MVK%20RKD/10_4_svedov_roskosmos.pdf).

## Automatic processing of space imagery in the ground segment of the domestic multi-satellite constellation of remote sensing spacecrafts

D. I. Fedotkin<sup>1</sup>, E. N. Borovenskiy<sup>1</sup>, D. V. Sysenko<sup>1</sup>, A. V. Yadykin<sup>1</sup>, P. A. Loshkarev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Research Institute of Precision Instruments, Moscow 127490, Russia*  
*E-mail: iprs@mail.ru*

<sup>2</sup> *AO Central Research Institute for Machine Building*  
*Korolev 141070, Moscow Region, Russia*  
*E-mail: loshkarevpa@tsniimash.ru*

The article is devoted to new software complexes and technologies for automatic processing of remote sensing (RS) data. The software complexes were developed within the framework of state contracts commissioned by the Roscosmos State Corporation in order to modernize the ground segment of the domestic orbital group of remote sensing spacecrafts. The prerequisites for the creation, the main advantages and technical solutions of a unified complex of automatic streaming data processing (ASDP) are considered. ASDP is a key element of the unified geographically distributed system RS. The main characteristics and statistics of the successful operation of the ASDP complex for processing data from domestic RS spacecraft at the request of consumers within the framework of ensuring the functioning of the Federal Data Fund of Earth Remote Sensing are presented. The key technical solutions and algorithms implemented in the subsystem of data processing (SDP) of the information system “Digital Earth” are considered. The SDP is being created as a logical continuation of modernization of the domestic ground segment of RS. The results of high-precision and high-performance automatic processing of satellite imagery data are presented, including the construction of continuous seamless tonally balanced orthorectified coatings (orthomosaic) at the request of consumers. The results of the analysis of the accuracy characteristics of orthomosaic created in automatic mode are presented, showing the achievement of geo-referencing accuracy comparable to the spatial resolution of the data. The described software complexes made it possible to make a qualitative transition in ground-based data processing for the domestic remote sensing system. The following results have been achieved: the number of operators involved in processing has been reduced from more than fifty to a fully automatic processing machine; more than a hundred pieces of equipment (mainly PC) have been reduced to several servers; processing speed has accelerated from several hours and days to several minutes; the accuracy of geolocation has been increased from tens and hundreds of meters to units of meters. All this will ensure the readiness of the ground-based remote sensing segment for streaming high-precision processing of large amounts of information from projected domestic multi-satellite groupings with hundreds of spacecrafts in orbit and creation of operational thematic remote sensing services based on them.

**Keywords:** ground segment of remote sensing, automatic stream data processing of remote sensing data, seamless orthophotomosaic, ASDP, Digital Earth

Accepted: 12.04.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-9-30

## References

1. Boltachev M. N., Providing information products to regional consumers through the complex “Digital Earth – Services”, *Materialy 2-i sovmestnoi Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii “Tsifrovaya real’nost’: kosmicheskie i prostranstvennye dannye, tekhnologii obrabotki”* (Proc. 2<sup>nd</sup> Joint Intern. Scientific

- and Technical Conf. “Digital Reality: Space and Geospatial Data, Processing Technologies”), Saint Petersburg, 2022, <https://conf.racurs.ru/upload/2022/Ppt/БОЛТАЧЕВ.pdf>.
2. Borovenskii E. N., Sysenko D. V., Fedotkin D. I., Yadykin A. V., Unified Geographically Distributed System (UGDS) of Remote Sensing (RS): automatic streaming data processing (ASDP) as an operating alternative to ground-based complexes for receiving, processing and distributing information and the basis of the federal RS data fund, *Materialy 11-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii “Aktual’nye problemy sozdaniya kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli”* (Proc. 11<sup>th</sup> Intern. Scientific and Technical Conf. “Actual Problems of Creation of Space Systems of Remote Sensing of the Earth”), 2023, pp. 109–118 (in Russian), [https://www.vniem.ru/ru/uploads/files/conferences/231010/sbornik\\_tezisov\\_2023.pdf](https://www.vniem.ru/ru/uploads/files/conferences/231010/sbornik_tezisov_2023.pdf).
  3. Kushnyr O. V., Capabilities of the Russian Space Remote Sensing System for Solving Socio-Economic Problems, *Materialy 8-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Geodeziya. Marksheideriya. Aeros”emka. Na rubezhe vekov”* (Proc. 8<sup>th</sup> Intern. Scientific and Practical Conf. “Geodesy. Surveying. Aerial photography. At the turn of the century”, 2017, <https://con-fig.com/wp-content/uploads/2018/11/kushnyr.pdf>.
  4. Loshkarev P. A., Fedotkin D. I., Borovenskii E. N., Sysenko D. V., Yadykin A. V., Practical results of the operation of automatic data processing technology — qualitatively new opportunities and prospects for the functioning of the Remote Sensing Data Fund and the Digital Earth information system, *Materialy 18-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”* (Proc. 18<sup>th</sup> All-Russia Open Conf. “Current problems in remote sensing of the Earth from space”), 2020, p. 436 (in Russian), DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
  5. Natarova E. V., About the practical results of the implementation of the “Digital Earth” project within the infrastructure of the national program “Digital Economy of the Russian Federation” in the pilot regions of the Russian Federation, *Materialy 6-go zasedaniya Mezhdovedstvennoi komissii po ispol’zovaniyu rezul’tatov kosmicheskoi deyatel’nosti* (Proc. 6<sup>th</sup> Meeting of the Interdepartmental Commission on the Use of the Results of Space Activities), Tula, 2023, [https://www.roscosmos.ru/media/files/2023/July/6%20MVK%20RKD/11\\_0\\_natarova\\_terrateh.pdf](https://www.roscosmos.ru/media/files/2023/July/6%20MVK%20RKD/11_0_natarova_terrateh.pdf).
  6. Pavlov A. V., Nikitin I. A., Gron’ A. V., Golovina T. Yu., Federal Fund for Remote Sensing Data from Space. Features of providing remote sensing data to individuals and legal entities: appendix, *Distantsionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa: sbornik informatsionnykh materialov* (Collection of information materials “Remote sensing of the Earth from space”), 2021, No 18(77), pp. 43–51 (in Russian), <https://www.roscosmos.ru/media/files/2022/Dec/18..77..10.21.pdf>.
  7. Romashkin V. V., Loshkarev P. A., Fedotkin D. I. et al., UGDIS ERS — modern solutions in the development of domestic terrestrial space infrastructure of Earth remote sensing from space, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 220–227 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-220-227.
  8. Shvedov D. O., About providing consumers data from the Federal Remote Sensing Data Fund in 2022 year, *Materialy 6-go zasedaniya Mezhdovedstvennoi komissii po ispol’zovaniyu rezul’tatov kosmicheskoi deyatel’nosti* (Proc. 6<sup>th</sup> Meeting of the Interdepartmental Commission on the Use of the Results of Space Activities), Tula, 2023, [https://www.roscosmos.ru/media/files/2023/July/6%20MVK%20RKD/10\\_4\\_svedov\\_roskosmos.pdf](https://www.roscosmos.ru/media/files/2023/July/6%20MVK%20RKD/10_4_svedov_roskosmos.pdf).
  9. Fedotkin D. I., Tokhiyan O. O., Promising approaches to the construction of data processing complexes, *Distantsionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa v Rossii: sbornik informatsionnykh materialov*, 2018, No. 1, pp. 34–43 (in Russian), <https://www.roscosmos.ru/media/pdf/dzz/dzz-2018-01.pdf>.
  10. Fedotkin D. I., Borovenskii E. N., Sysenko D. V., Yadykin A. V. (2022a), The complex of automatic streaming data processing — the results of operation in the interests of consumers of the Federal Data Fund for Remote Sensing Data of the Earth (FDF RS), *Materialy 20-i Mezhdunarodnoi konferentsii “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”* (Proc. 20<sup>th</sup> Intern. Conf. “Current problems in remote sensing of the Earth from space”), 2022, p. 72 (in Russian), DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
  11. Fedotkin D. I., Yadykin A. V., Borovenskii E. N., Sysenko D. V. (2022b), The results of the operation of the complex of automatic streaming data processing in the interests of consumers of the Federal Fund of remote sensing data of the Russian Federation, *Materialy 10-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii “Aktual’nye problemy sozdaniya kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli”* (Proc. 10<sup>th</sup> Intern. Scientific and Technical Conf. “Actual problems of creation of space systems of remote sensing of the Earth”), 2022, pp. 139–143 (in Russian), [https://www.vniem.ru/ru/uploads/files/conferences/220929/materialy\\_2022.pdf](https://www.vniem.ru/ru/uploads/files/conferences/220929/materialy_2022.pdf).
  12. Fedotkin D. I., Borovenskii E. N., Sysenko D. V., Yadykin A. V. (2022c), The complex of automatic streaming data processing (ASDP) is a new level of speed and quality of remote sensing data processing, *Materialy 20-i Mezhdunarodnoi konferentsii “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”* (Proc. 20<sup>th</sup> Intern. Conf. “Current problems of remote sensing in the Earth from space”), 2022, p. 73 (in Russian), DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.

13. Fedotkin D. I., Borovenskiy E. N., Sysenko D. V., Yadykin A. V. (2023a), Software complexes and technologies for automatic satellite data processing that ensure the operation of the federal remote sensing data fund, *Materialy 3-i sovместnoi Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Tsifrovaya real'nost': kosmicheskie i prostranstvennye dannye, tekhnologii obrabotki"* (Proc. 3<sup>rd</sup> Joint Intern. Scientific and Technical Conf. "Digital Reality: Space and Geospatial Data, Processing Technologies"), 2023, pp. 8–16, [https://conf.racurs.ru/upload/2023/Materials23\\_www.pdf](https://conf.racurs.ru/upload/2023/Materials23_www.pdf).
14. Fedotkin D. I., Borovenskiy E. N., Sysenko D. V., Yadykin A. V. (2023b), Automatic data processing of space imagery in the ground segment of the domestic multi-satellite constellation of remote sensing spacecraft, *Materialy 21-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 21<sup>st</sup> Intern. Conf. "Current problems in remote sensing in the Earth from space"), 2023, p. 58 (in Russian), DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a.