

Верификация качества геореференцирования данных и информационных продуктов российских космических систем дистанционного зондирования Земли

А. И. Васильев¹, С. М. Соколов²

¹ Научный центр оперативного мониторинга Земли, Москва, 127490, Россия
E-mail: a.vasilyev@ntsomz.ru

² Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша, Москва, 125047, Россия
E-mail: sokolsm@keldysh.ru

Рассматриваются вопросы контроля качества геореференцирования данных и информационных продуктов ДЗЗ. Используя для оценки качества подход на основе сопоставления изображения снимка с известным заранее хорошо геопривязанным изображением, в настоящей работе предлагается методический аппарат контроля спутниковых изображений различной степени их фотограмметрической обработки. Приводятся алгоритмические особенности оценки качества геореференцирования данных архива Оператора космических систем (КС) ДЗЗ, содержащего преимущественно данные, не приведённые к картографической проекции. Результаты оценок демонстрируются применительно к снимкам КС ДЗЗ «Канопус-В» и «Ресурс-П». Для данных КС ДЗЗ «Канопус-В» (разрешающая способность съёмочной системы 2,1 м) критерий SE90 (*англ.* Circular Error) соответствует порогу не более 67 м. Для данных КС ДЗЗ «Ресурс-П» (разрешающая способность съёмочной системы 0,7 м) критерий SE90 соответствует порогу не более 30,8 м. Полученные оценки демонстрируют точность данных архива Оператора лучше результатов, приводимых другими исследователями. Обосновываются причины данных различий. Кроме того, в статье рассматривается оценка качества мозаичных покрытий с целью верификации геопривязки и контроля синтеза каналов. Для выходной ортопродукции космического аппарата «Канопус-В», формируемой в технологическом контуре Оператора, демонстрируются результаты оценки: критерию SE90 соответствует пороговое значение не более 8,4 м. В заключении отмечается актуальность предложенных в статье решений с учётом создания перспективных многоспутниковых группировок.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космический аппарат, обработка данных, информационный продукт, контроль качества, геопривязка, «Канопус-В», «Ресурс-П», мозаичное покрытие, бесшовное сплошное покрытие

Одобрена к печати: 18.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-33-52

Введение

Самое широкое и разностороннее применение космической информации ДЗЗ в различных научных и прикладных задачах с конца XX и начала XXI в. определило тенденции в виде многоуровневой обработки данных ДЗЗ, задаваемой соответствующими классификациями формируемых информационных продуктов ДЗЗ. При этом среди целого ряда различных международных классификаций обработки данных ДЗЗ (рассмотренных, например, в работе (Лупян, Саворский, 2012)) следует выделить классификацию CEOS (*англ.* Committee on Earth Observation Satellites, Комитет по спутниковому наблюдению Земли из космоса), наиболее полно описывающую основные виды продуктов ДЗЗ (*табл. 1*). В соответствии с этой классификацией L1-продукты (далее — продукты стандартной обработки) являются основой для формирования продуктов более высоких уровней. Таким образом верификация качества стандартных продуктов обуславливает границы применимости космических данных для решения прикладных задач. Учитывая данное обстоятельство, для классификации уровней обработки данных ДЗЗ Роскосмоса (ГОСТ..., 2021) акцентированы уровни, характерные для особенностей формирования стандартных продуктов в части фотограмметрической обработки.

Таблица 1. Классификация уровней обработки данных ДЗЗ СЕОС

Уровень обработки	Описание информационного продукта
L0	Исходные «сырые» данные, зарегистрированные сенсором
L1	Данные ДЗЗ, прошедшие радиометрическую и геометрическую коррекцию
L2	Геофизические величины, рассчитанные по данным ДЗЗ, прошедшим радиометрическую и геометрическую коррекцию
L3	Мозаичные покрытия, сформированные на основе данных ДЗЗ или геофизических величин
L4	Информация, извлечённая на основе данных более низких уровней (например, стереоизмерения или дешифрирование и идентификация объектов интереса)

В качестве основных показателей качества L1-продуктов для оптико-электронных съёмочных систем ДЗЗ выделяют следующие:

- 1) точность геореференцирования снимков — ошибки геореференцирования, определяемые сбоями навигационного оборудования, а также изменением параметров конструктива сенсора и/или характеристик оптических элементов в ходе эксплуатации. При этом ошибки геореференцирования отдельных изображений спектральных каналов снимка (например, обусловленных спецификой съёмочной системы (Бакланов и др., 2016; Некрасов, 2012)) приводят к ошибкам сведения изображений (далее — цветосинтеза) результирующего многоканального снимка;
- 2) радиометрическая однородность по полю изображения — яркостные линейные или точечные дефекты на изображениях, вызванные сбоями работы фотоприёмных устройств (например, блюминг) либо потерей/искажением информации (например, импульсные помехи), а также изменениями светочувствительности отдельных ПЗС-элементов (ПЗС — прибор с зарядовой связью) сенсора (примеры коррекции таких искажений приведены в публикациях (Васильев и др., 2019; Еремеев и др., 2021));
- 3) точность измерения энергетической яркости — ошибки измерения, которые обуславливаются деградацией оптико-электронной съёмочной системы, включая ослабление характеристик светочувствительных элементов фотоприёмных устройств (примеры контроля точности измерения энергетической яркости данных российских космических аппаратов (КА) ДЗЗ рассматриваются в работах (Васильев и др., 2017, 2023а; Жуков и др., 2014)).

Соответственно ошибки геореференцирования снимков приводят к разрывам линейных объектов (например, дорог) на изображениях мозаичных покрытий (L3-продукты). Яркостная неоднородность либо точечные дефекты/артефакты будут искажать рассчитываемые вегетационные индексы (L2-продукты) в локальных окрестностях. При этом значительные ошибки измерения энергетической яркости принципиально не позволят формировать L2-продукты. Таким образом, верификация геометрических (точность геореференцирования и цветосинтеза) и радиометрических (однородность и точность измерения энергетической яркости) показателей качества обуславливает границы применимости данных оптико-электронных съёмочных систем ДЗЗ.

Проблемные вопросы верификации качества геореференцирования данных российских космических систем ДЗЗ

Научный центр оперативного мониторинга Земли является Оператором космических систем ДЗЗ (далее Оператор КС ДЗЗ), предоставляя «доступ всем заинтересованным лицам и организациям к российским данным ДЗЗ из космоса» (<https://ntsomz.ru/o-tsentre/>). Предоставление доступа к данным и информационным продуктам ДЗЗ осуществляется посредством

веб-сервисов (<https://www.gptl.ru/>, <https://next.gptl.ru/>, <https://bbp.ntsomz.ru/>). Для стандартной обработки данных российских КС ДЗЗ, принятых на антенные комплексы из состава ЕТРИС (Единая территориально-распределённая информационная система (<https://ntsomz.ru/etris-dzz/>)) ДЗЗ, применяются программные комплексы интерактивной обработки (с участием операторов), созданные разработчиками соответствующих КС ДЗЗ. В свою очередь, в обеспечении увеличения оперативности и объёмов предоставляемых данных и информационных продуктов задействуются комплексы автоматической потоковой обработки данных российских КС ДЗЗ (Кузнецов, 2016; Федоткин и др., 2024; Markov et al., 2019). При этом следует отметить, что для отдельных выборок данных КС ДЗЗ (при сбоях бортовых навигационных систем) предусматривается грубая интерактивная оценка качества геореференцирования данных ДЗЗ в рамках технологического контура Оператора при первичной каталогизации отснятой информации. Например, для снимков КА «Ресурс-П» выполняется оценка с точностью не лучше 50 м, для КА «Канопус-В» — не лучше 80 м. Оценка качества выходной продукции (предоставляемой потребителям) осуществляется человеком при интерактивной обработке либо с использованием «внутренних» алгоритмов комплексов автоматической обработки. Таким образом, применительно к задаче контроля качества геореференцирования данных и информационных продуктов можно обозначить следующие основные проблемы технологического контура Оператора: 1) архив Оператора содержит L0-данные съёмки российских КС ДЗЗ, для которых известны достаточно грубые показатели точности геореференцирования отдельных наборов снимков; 2) отсутствуют штатные технологии контроля геопривязки данных и информационных продуктов ДЗЗ, предоставляемых потребителям. Учитывая, что для перспективных многоспутниковых группировок КА ДЗЗ (в частности, КА «Зоркий-2М») предусматривается предоставление данных съёмки в Федеральный фонд данных ДЗЗ (<https://ntsomz.ru/federalnyy-fond-dannykh-dzz/>), необходимость создания технологической оценки качества (в том числе в части геореференцирования) данных и информационных продуктов ДЗЗ в технологическом контуре Оператора является критической.

Далее применительно к задаче контроля качества геореференцирования данных ДЗЗ подробнее рассматривается подход на основе сопоставления изображения снимка с известным заранее качественно геопривязанным изображением. Такой подход также активно применяется исследователями при обработке снимков российских КА ДЗЗ в зависимости от выбора эталонных спутниковых изображений. В статье (Кузнецов и др., 2015) предлагается технология контроля геопривязки изображений ДЗЗ высокого разрешения на основе сопоставления со снимками КА Landsat-8. При этом в публикации (Васильев, 2023) приводятся оценки качества геореференцирования выборки данных (среднего разрешения, GSD (*англ.* ground sample distance) — 10–100 м) архива съёмки комплекса многозональной съёмочной системы (КМСС) КА «Метеор-М» № 2 также относительно изображений КА Landsat-8. В свою очередь в статье (Федоткин и др., 2024) демонстрируются показатели качества L0-данных КА «Канопус-В» и «Ресурс-П» (авторами не раскрыта информация о данных, выбранных в качестве эталонных), автоматически обрабатываемых в рамках специализированного программного комплекса АПОИ (автоматическая потоковая обработка информации ДЗЗ). В работе (Плотников и др., 2020) показаны статистические оценки аномалий геопривязки фрагментов выходной продукции КМСС КА «Метеор-М» № 2 (изображений, трансформированных в картографическую проекцию) относительно изображений MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) КА Terra. Отдельные эксперименты в части оценки точности совмещения (или цветосинтеза) изображений спектральных каналов для снимков КА «Канопус-В» и «Ресурс-П» рассматриваются в публикациях (Алексанин и др., 2018, 2020). При этом в работе (Васильев и др., 2023б) предлагается проводить анализ качества цветосинтеза бесшовного сплошного покрытия КА «Канопус-В».

Приведённый обзор дополнительно подтверждает актуальность задачи контроля качества геореференцирования данных российских КА ДЗЗ. Учитывая, что исследователи анализируют данные съёмки, прошедшие различную степень фотограмметрической обработки, далее в рамках настоящей статьи предлагается единый методический аппарат для контроля качества геореференцирования изображений снимков различной степени их фотограмметрической

обработки (с учётом подуровней L1-продуктов по классификации CEOS). На основе предложенного методического аппарата выполнена разработка программно-алгоритмического обеспечения, с использованием которого проведены эксперименты по оценке точности геопривязки данных и продуктов архива Оператора КС ДЗЗ. Полученные оценки обсуждаются относительно результатов других исследователей в части сопоставимости и расхождения величин. Контроль геопривязки выходной продукции (орторектифицированных информационных продуктов ДЗЗ) в том числе демонстрируется на примере анализа качества мозаичных покрытий. Согласованность качества геопривязки различных мозаик является важным показателем их достоверности, а также допустимости использования для решения различных прикладных задач количественного анализа. В заключении отмечаются перспективы развития рассмотренных в настоящей статье решений.

Контроль качества геопривязки данных ДЗЗ на основе сопоставления с опорным изображением

Для контроля качества геопривязки данных ДЗЗ рассмотрим подход на основе сопоставления изображения анализируемого снимка с некоторым опорным изображением — изображением наблюдаемой местности, имеющим известную (субпиксельную) точность геопривязки. Такой подход широко используется как в интерактивных геоинформационных средах (например, <https://www.giscourse.com/image-to-image-co-registration-in-qgis/>), так и в библиотечных фреймворках, например, AROSICS (*англ.* Automated and Robust Open-Source Image Co-Registration Software) (Scheffler et al., 2017). При этом для автоматического сопоставления изображений применяются две основных стратегии: 1) идентификация множества точечных соответствий с использованием признаков методов, на основе которых рассчитывается преобразование между изображениями, обеспечивающее их совмещение (или корегистрацию (*англ.* coregistration)); 2) с использованием площадных методов оценивается интегральный сдвиг между изображениями либо их фрагментами. Обзор различных алгоритмов и методов в рамках этих стратегий можно найти, например, в работах (Huang et al., 2024; Jiang et al., 2021). Хотя выбор соответствующей стратегии и алгоритма сопоставления во многом и определяется прикладной задачей, однако применение признаков методов для обнаружения точечных соответствий допускает различные модели совмещения изображений. Данное обстоятельство наиболее актуально для уровней стандартной обработки, не прошедших процедуру орторектификации (*табл. 2*). Далее подробнее рассмотрим задачу сопоставления изображений на основе признаков методов, включая характерные особенности данного подхода.

Таблица 2. Уровни стандартной обработки по классификации CEOS, различающиеся по степени фотограмметрической обработки

Уровень обработки	Описание
1B	Данные, прошедшие радиометрическую и геометрическую коррекцию. Применена абсолютная радиометрическая калибровка. Задаются параметры, определяющие связь пиксельных и географических координат местности
1C	Данные, приведённые к стандартной картографической проекции. Изображения трансформированы без учёта рельефа (на среднюю плоскость). Дополнительно могут быть предоставлены параметры, определяющие связь пиксельных и географических координат местности
1D	Орторектифицированные данные (с учётом рельефа), приведённые в заданную картографическую проекцию

Формализованная постановка сравнения изображения снимка I и опорного изображения I' на основе признаков методов может быть записана в следующем виде:

$$M(I, I') \rightarrow \{\bar{p}_i, \bar{q}_i\},$$

где $M(I, I')$ — оператор сопоставления изображений, определяющий множество пар пиксельных координат одноимённых точек на сравниваемых изображениях; $\{\bar{p}_i, \bar{q}_i\}$ — множество пар пиксельных координат одноимённых точек (характеризующихся идентичными окрестностями фрагментов изображений) для изображения снимка I и опорного изображения I' соответственно.

В виду того, что в результате сопоставления изображений допускаются ошибки идентификации, корректность обнаружения одноимённых точек определяется на основе их соответствия модели ограничений G следующим образом:

$$G(\bar{p}, \bar{q}, \bar{\gamma}) < [\varepsilon],$$

где $\bar{\gamma}$ — вектор параметров модели ограничений; $G(\bar{p}, \bar{q}, \bar{\gamma})$ — положительно-определённая функция; $[\varepsilon]$ — предельно допустимая ошибка.

В качестве характерных особенностей подхода следует отметить следующие: 1) опорное изображение I' должно быть предварительно сформировано для проведения анализа качества геореференцирования; 2) в качестве оператора M сопоставления изображений применяются признаковые методы, например, (Bay et al., 2006; Dumanu et al., 2019; Lowe, 2004), обеспечивающие идентификацию одноимённых точек; 3) модель ограничений G задаётся, как правило, на основе геометрической модели формирования изображения снимка, модели совмещения изображений либо физически интерпретируемых допущений; 4) для оценки параметров $\bar{\gamma}$ модели ограничений G в совокупности с фильтрацией ложных одноимённых точек широкое распространение получила RANSAC-стратегия (англ. RANdom SAMple Consensus) (Fischler, Bolles, 1981) и её модификации (например, (Barath et al., 2019)).

С использованием приведённого подхода предлагается методический аппарат оценки качества данных ДЗЗ различной степени их фотограмметрической обработки.

Методический аппарат контроля качества геореференцирования данных ДЗЗ

Контроль качества орторектифицированных информационных продуктов ДЗЗ

Орторектифицированными называются информационные продукты ДЗЗ, прошедшие геометрическую коррекцию и трансформирование в картографическую проекцию с учётом цифровой модели рельефа (ЦМР). На практике орторектификация характерна всем информационным продуктам, обработанным до L1D (см. табл. 2) и выше (в частности, мозаичным L3-покрытиям). При этом коррекция с учётом рельефа обуславливает специфику контроля геореференцирования орторектифицированных информационных продуктов ДЗЗ — требуется, фактически, сопоставление с опорным изображением по всей области информационного продукта. Влияние рельефа в совокупности с нелинейным характером процедуры орторектификации при ошибках геопривязки снимков будет приводить к различным по величине и направлению векторам смещения на изображении ортопродукта. Данный феномен, фактически, наблюдается в работе (Плотников и др., 2020) применительно к снимкам КМСС КА «Метеор-М». Соответственно, применение признаковых методов для сопоставления анализируемых изображений с опорным изображением целесообразно проводить в локальных окрестностях, например, вследствие фрагментации области интереса. Этот приём использовался авторами в работе (Алексанин и др., 2018) при решении задачи совмещения ортотрансформированных изображений КА «Ресурс-П».

Таким образом, применительно к орторектифицированным данным и информационным продуктам ДЗЗ рассмотрим в качестве модели ограничений систематический сдвиг

$$G(\bar{p}, \bar{q}, \bar{\rho}) = (\bar{p} - \bar{q}) - \bar{\rho},$$

где $\{\bar{p}, \bar{q}\}$ — пара пиксельных координат одноимённой точки для изображения продукта I и опорного изображения I' соответственно; \bar{p} — параметр систематического сдвига между изображением продукта I и опорным изображением I' .

Для оценки систематического сдвига на основе множества одноимённых точек будем использовать следующий критерий:

$$\sum_i \Theta(\delta - \|G(\bar{p}_i, \bar{q}_i, \bar{p})\|) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где δ — предельно допустимый порог (является параметром алгоритма) несогласованности пиксельных координат соответствий оцениваемой модели сдвига \bar{p} ; $\Theta(\cdot)$ — кусочно-постоянная функция, равная нулю для отрицательных значений аргумента и единице — для положительных.

Таким образом, обеспечивается фильтрация ложных одноимённых точек, а также оценка доминирующей величины сдвига. Учитывая, что параметры сдвига можно оценить на основе только одной пары соответствий, для максимизации (1) допустимо использовать полный перебор (по всем найденным соответствиям), вычислительная сложность которого соответствует $o(n^2)$.

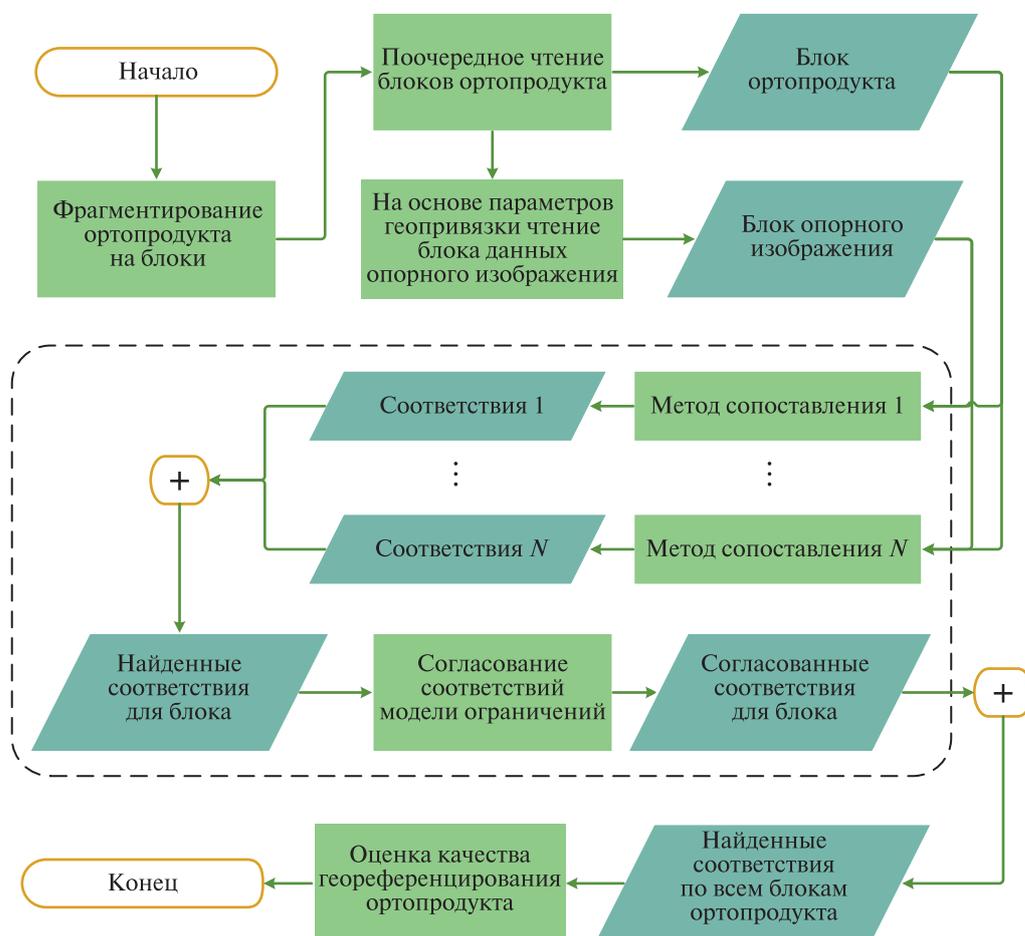


Рис. 1. Методическая схема оценки качества геоференцирования ортопродуктов на основе сопоставления с опорным изображением (штриховой линией отмечена процедура сопоставления блоков ортопродукта и опорного изображения)

На рис. 1 приведена методическая схема оценки качества геоференцирования изображения спектрального канала ортопродукта на основе сопоставления с опорным изображением (соответствующего спектрального канала). Отметим характерные особенности реализации приведённой методики сопоставления ортопродукта и опорного изображения:

- 1) предварительно обеспечивается приведение опорного изображения к пространственному разрешению ортопродукта и соответствующей картографической проекции;
- 2) для каждого блока (полученного в результате фрагментирования ортопродукта) с учётом параметров геопривязки ортопродукта рассчитывается соответствующий блок опорного изображения, при этом для блока изображения дополнительно может оцениваться допустимость сопоставления на основе анализа маски воды, а также маски облачности сцены/продукта (при наличии);
- 3) для сопоставления блоков изображений допустимо применение ансамбля различных признаков методов для увеличения количества детектируемых соответствий. Для повышения надёжности сопоставления, а также ускорения обработки дополнительно целесообразно учитывать пространственное расположение соответствий (например, игнорируются соответствия, расстояние между которыми более предельно допустимого количества пикселей);
- 4) по результатам обработки всех блоков выполняется расчёт систематического сдвига для каждого блока относительно опорного изображения. После чего обеспечивается оценка качества геореференцирования ортопродукта на основе маркирования цветом блока (а также маркирования цветом найденных точечных соответствий) в зависимости от величины систематического сдвига.

Контроль качества геореференцирования изображений L1С-снимков

Применение приближённых геометрических моделей снимка, описывающих связь пространственных географических координат и пиксельных координат изображения, наиболее широкое распространение получило для L1B/L1C-данных ДЗЗ высокого (GSD — 1–10 м) и сверхвысокого (GSD — не более 1 м) пространственного разрешения. Данное обстоятельство обусловлено ограничениями на распространение открытой точной (не хуже 0,5-пиксельной точности) топогеодезической основы (а именно опорные точки и ЦМР) для формирования орторектифицированных информационных продуктов ДЗЗ. Соответственно, потребители данной космической информации дополнительно должны обрабатывать (орторектифицировать) такие снимки с учётом имеющихся у них опорных данных с целью решения своих прикладных задач. При этом в качестве приближённой геометрической модели снимка наиболее широко применяются дробно-рациональные полиномиальные функции (или RPC-модель (*англ.* Rational Polynomial Coefficients)), обеспечивающие аппроксимацию «строгих» фотограмметрических моделей наблюдения Земли из космоса (Grodecki, 2001).

Основываясь на результатах контроля точности геореференцирования данных КМСС КА «Метеор-М» (Васильев, 2023), рассмотрим общую методику контроля качества изображений L1C-снимков: 1) определение границ локальных окрестностей/блоков для анализируемого изображения снимка и опорного изображения; 2) поблочное сопоставление и поиск множества одноимённых точек между локальными окрестностями/блоками анализируемого и опорного изображения; 3) определение параметров модели ограничений (в качестве которой традиционно выступает либо аффинное преобразование, либо сдвиг) в совокупности с фильтрацией ошибочных найденных соответствий (по результатам блочного сопоставления); 4) оценка точности геореференцирования на основе множества найденных соответствий (с учётом исключённых ошибочных соответствий).

Формализованная постановка задачи оценки систематической поправки по результатам блочного сопоставления одноимённых точек $\{\bar{p}_i, \bar{q}_i\}$ может быть описана следующим образом:

$$\{\bar{q}_i\} \stackrel{\text{GeoT}}{\Rightarrow} \{X_i, Y_i\} \Rightarrow \{X_i, Y_i, \text{DEM}(X_i, Y_i)\} \stackrel{\text{RPC}}{\Rightarrow} \{\bar{q}'_i\}, \quad (2)$$

$$\sum_i \left\| \begin{bmatrix} u_i & v_i \end{bmatrix} - W \begin{bmatrix} u'_i & v'_i & 1 \end{bmatrix}^T \right\|^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $\{\bar{p}_i, \bar{q}_i\}$ — пары пиксельных координат соответствий для изображения I и опорного покрытия I' соответственно; $\bar{p}_i = [u_i \ v_i]^T$ — пиксельные координаты i -го соответствия для изображения I ; $\bar{q}_i = [x_i \ y_i]^T$ — пиксельные координаты i -го соответствия для опорного покрытия I' ; $\bar{q}'_i = [u'_i \ v'_i]^T$ — пиксельные координаты i -го соответствия опорного покрытия I' пересчитанные с использованием (2) на изображение I ; $GeoT: R^2 \rightarrow R^2$ — функция определения плановых географических координат на основе пиксельных (опорного покрытия I'), как правило, задаваемая параметрами масштаба и сдвига; $DEM: R^2 \rightarrow R$ — функция определения высоты ЦМР на основе плановых географических координат; $RPC: R^3 \rightarrow R^2$ — функция RPC-модели снимка, определяющая пиксельные координаты на изображении на основе положения точки в пространстве; W — 3×2 матрица поправок.

На рис. 2 демонстрируется методическая схема оценки качества геоференцирования изображения спектрального канала ЛИС-данных. Для этой схемы исходные растровые данные снимков и опорного покрытия предварительно приводятся к одному пространственному разрешению и одной картографической проекции. Кроме того, применяется сопоставление блоков на основе ансамбля методов сопоставления, рассматриваемых в методике оценки качества ортопродуктов (см. рис. 1).

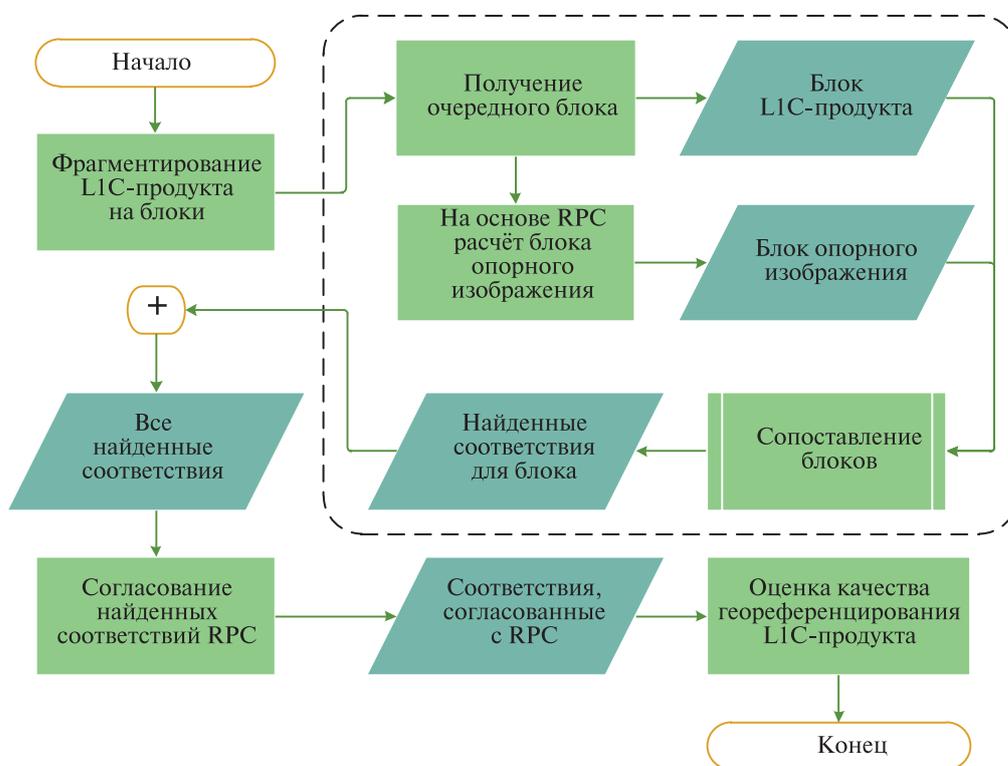


Рис. 2. Методическая схема оценки качества геоференцирования изображения ЛИС-данных (для сопоставления блоков задействуется процедура, приведённая на рис. 1). Штриховой линией выделена процедура поиска соответствий

Контроль качества геоференцирования изображений Л1В-снимков

Оценка качества геоференцирования Л1В-данных, сопровождаемых RPC, допускает следующие стратегии: 1) Л1В-изображение трансформируется в картографическую проекцию на основе заданной геометрической модели снимка, после чего выполняется сопоставление с опорой; 2) опорное изображение на основе RPC трансформируется в систему координат изображения Л1В-данных, после чего выполняется сопоставление изображений в данной системе координат. Преимущества каждой из стратегий определяются целевой зада-

чей. Вместе с тем первая стратегия обеспечивает «эталонное» качество опорных данных (без каких-либо геометрических искажений и передискретизаций), что в целом предпочтительно для алгоритмов сопоставления. Кроме того, для данной стратегии перерасчёт RPC для трансформированного на плоскость (соответствующую средней высоте района интереса) снимка обеспечивает формирование L1С-данных и применение соответствующей методики (см. рис. 2) для оценки качества геоереференцирования. Альтернативное решение — сопоставление трансформированного снимка с опорным изображением и последующий пересчёт пиксельных координат соответствий в систему координат изображения L1В-данных для последующего согласования относительно RPC L1В-данных (рис. 3). В данном случае пересчёт пиксельных координат соответствий к L1В-изображению запишем следующим образом:

$$\{\bar{r}_i\} \xRightarrow{\text{GeoT}} \{X_i, Y_i\} \Rightarrow \{X_i, Y_i, H\} \xRightarrow{\text{RPC}} \{\bar{r}'_i\},$$

где $\{\bar{r}_i\}$ — пиксельные координаты опорных точек, идентифицированных на L1С-изображении снимка (по результатам сопоставления с опорным изображением); H — средняя высота местности области покрытия снимком (для которого выполнено трансформирование); $\{\bar{r}'_i\}$ — рассчитанные пиксельные координаты опорных точек на L1В-изображении снимка.

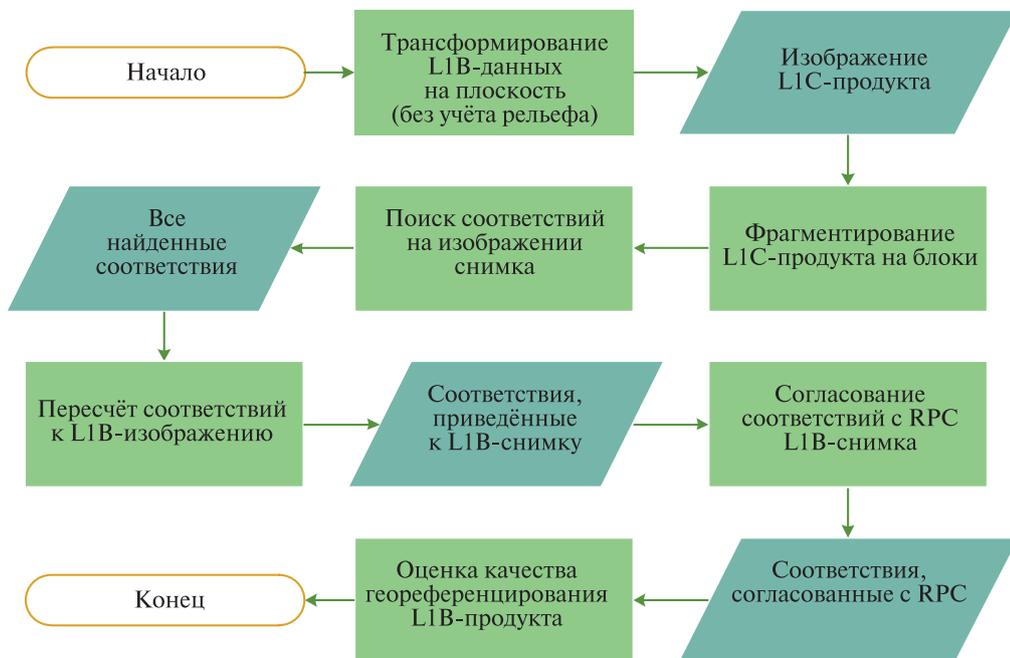


Рис. 3. Методическая схема оценки качества геоереференцирования изображения L1В-данных (для поиска соответствий задействуется процедура, приведённая на рис. 2)

Оценка качества геоереференцирования данных архива Оператора космических систем ДЗЗ

Применительно к данным съёмочных систем «Геотон-Л1» КА «Ресурс-П» и ПСС (панхроматическая съёмочная система) КА «Канопус-В» (GSD составляет 2,1 м) было разработано программное обеспечение оценки точности геоереференцирования L1В-данных, опираясь на рассмотренный методический аппарат, а также с учётом специфики съёмочных систем. При этом в качестве критерия точности геоереференцирования снимков применялось следующее соотношение:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \|\bar{p}_i - \bar{q}'_i\|^2}, \quad (4)$$

где $\{\bar{p}, \bar{q}\}$ — пара пиксельных координат соответствий для изображения снимка и опорного изображения соответственно; \bar{q}'_i — пиксельные координаты, рассчитанные на основе геометрической модели снимка изображения для географических координат i -й опорной точки $(X_i, Y_i, \text{DEM}(X_i, Y_i))$ вычисленных на основе пиксельных \bar{q}_i с использованием (2); N — количество соответствий.

Далее для оценки качества данных архива Оператора рассматривались данные Д33, предварительно подобранные в интересах формирования мозаичных покрытий территории Российской Федерации. При этом по углам съёмки отклонения в основном (более 90 % съёмок) были в пределах 20° . Уровень облачности составлял преимущественно не более 30 % (на маршрут съёмки). В качестве топогеодезического обеспечения в экспериментах рассматривались следующие данные: плановая основа — опорное покрытие, распространяемое компанией Planet Labs (<https://www.planet.com/>); высотная основа — ЦМР SRTM (*англ.* Shuttle Radar Topography Mission) (<https://doi.org/10.5066/F7PR7TFT>). Кроме того, для сопоставления изображений (в соответствии с методическим аппаратом) применялись следующие признаки: 1) алгоритм SIFT (*англ.* Scale-Invariant Feature Transform), обеспечивающий детектирование характерных окрестностей различного масштаба, для которых вычислялся дескриптор в виде гистограммы ориентаций градиентов (дескриптор HoG (*англ.* histogram of oriented gradients)), сопоставление дескрипторов выполнялось на основе вычисления отношения L2-метрик (евклидово расстояние) между рассматриваемым дескриптором и двумя наиболее ближайшими кандидатами (Lowe, 2004); 2) алгоритм Харриса (Harris, Stephens, 1988) для детектирования характерных точек, для которых формировался оконный дескриптор в виде фрагмента изображения, сопоставление дескрипторов выполнялось на основе метрики кросс-корреляции. Для оценки качества данных архива Оператора будем использовать критерий SE90 (*англ.* Circular Error) — это величина, которая не превышает ошибку геореференцирования ϵ для 90 % всех проанализированных снимков.

Оценка качества данных КА «Канопус-В»

Архив Оператора КС Д33 содержит L0-данные КА «Канопус-В», поэтому реализованное программное обеспечение оценки качества задействовало отдельные модули технологического контура стандартной обработки (Васильев и др., 2020а): 1) модуль распаковки — обеспечивает формирование массива микрокадров маршрута съёмки в виде отдельных растровых файлов; 2) модуль расчёта параметров RPC на основе навигационных данных и результатов геометрической калибровки. В таком случае для каждого микрокадра осуществлялся поиск опорных точек на основе общей методической схемы, приведённой на *рис. 3*. При этом (в отличие от схемы на *рис. 3*) согласование всех найденных соответствий выполнялось с учётом конструктивных особенностей ПСС: 1) для каждой шестёрки одномоментно отснятых микрокадров (примеры одномоментных включений ПСС приведены в работе (Васильев, 2015)) осуществлялся пересчёт пиксельных координат найденных соответствий в метрические координаты фокальной плоскости; 2) для пересчитанных соответствий одномоментных микрокадров выполнялась фильтрация ложных соответствий (с использованием RANSAC) с учётом оценки систематической поправки аналогично (3). Далее на основе отобранных/согласованных соответствий для каждого микрокадра проводилась оценка ошибки геореференцирования на основе (4).

На *рис. 4* (см. с. 43) приведено распределение доли количества включений в зависимости от ошибки геореференцирования на основе обработки более 3000 маршрутов съёмки ПСС КА «Канопус-В» (преимущественно данные КА «Канопус-В» № 3–6 и «Канопус-В-ИК»), отснятых за периоды май–октябрь 2018–2022 гг. на территорию РФ. Полученные результаты демонстрируют достаточно стабильное распределение — для более 99 % обработанных данных ошибка геопривязки не превышает 50 пикселей. При этом критерию SE90 соответствует ошибка геореференцирования не более 32 пикселей (или не более 67 м).

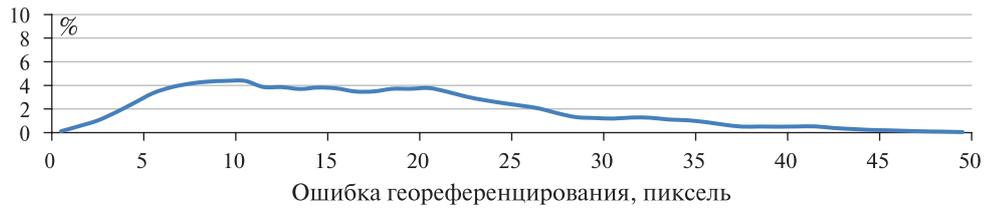


Рис. 4. Распределение количества обработанных микрокадров ПСС архива Оператора (в %) в зависимости от точности их геореференцирования

Оценка качества данных КА «Ресурс-П»

Учитывая, что для оценки точности геореференцирования данных оптико-электронной аппаратуры «Геотон-Л1» КА «Ресурс-П» (GSD для панхроматических данных составляет 0,7 м) предпочтительно использовать L1С-данные (Пошехонов и др., 2023), то для L1В-данных архива Оператора КС ДЗЗ выполнялось их приведение к L1С, включая перерасчёт RPC для последующей оценки качества согласно методической схеме, приведённой на рис. 2. При этом дополнительно обеспечивался распределённый отбор найденных соответствий в каждом блоке (размером 1000×1000 пикселей) с целью оценки (с использованием RANSAC) параметров систематической поправки W на основе (3), согласующейся с наибольшим количеством блоков. Для данных КА «Ресурс-П» № 1, в виду существенных ошибок навигационных систем КА, также применялась двухэтапная схема обработки (*англ.* coarse-to-fine): 1) поиск соответствий и расчёт матрицы W для загубленного вдвое изображения снимка; 2) поиск соответствий на исходном изображении с учётом предрасчитанной матрицы W . Кроме того, маршруты съёмки дополнительно фрагментировались вдоль трассы полёта на сцены (с учётом 5 % перекрытия).

На рис. 5 показано распределение на основе обработки более 5000 маршрутов «Геотон-Л1» КА «Ресурс-П», отснятых за периоды апрель–октябрь 2014–2021 гг. на территорию РФ, включая Белгородскую область, Чеченскую Республику, Еврейскую автономную область и др. Отдельно демонстрируется распределение для КА «Ресурс-П» № 1 и КА «Ресурс-П» № 2, 3. Критерий SE90 для данных КА «Ресурс-П» № 2, 3 — не более 44 пикселей (или не более 30,8 м), для КА «Ресурс-П» № 1 данный критерий выполняется для порога более 1000 пикселей (или более 700 м).

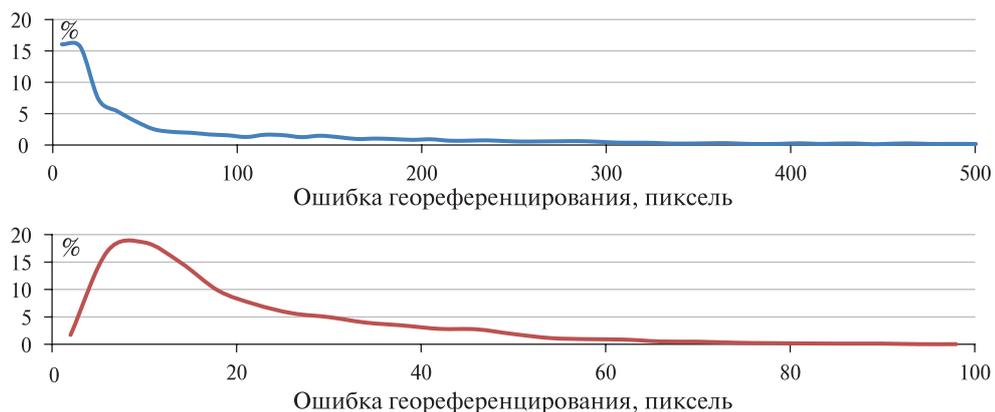


Рис. 5. Распределение количества сцен Геотон-Л1 (в %) в зависимости от точности геореференцирования: данные КА «Ресурс-П» № 1 (*сверху*); данные КА «Ресурс-П» № 2, 3 (*снизу*)

Обсуждение полученных оценок

Анализ сопоставимости рассчитанной точности геореференцирования данных архива Оператора рассмотрим относительно результатов оценки L0-данных, приведённых в работе

(Федоткин и др., 2024). Для этого в *табл. 3* представлены средние ошибки геопривязки для данных КА «Ресурс-П» и «Канопус-В» из указанной публикации, а также вычисленные средние величины ошибок геореференцирования для данных, отображённых на *рис. 4, 5* настоящей статьи.

Таблица 3. Сопоставление результатов оценок точности геореференцирования данных КА «Канопус-В» и «Ресурс-П» архива Оператора КС ДЗЗ относительно показателей, рассчитанных для L0-данных в работе (Федоткин и др., 2024)

КС ДЗЗ	КА «Ресурс-П»		КА «Канопус-В» № 3–6, КА «Канопус-В-ИК»
	№ 1	№ 2, 3	
Оценки для L0-данных	Более 3,8 км	22,4 м	63,4 м
Рассчитанные оценки для данных архива	208,7 м	14,4 м	37,8 м

Рассчитанные в настоящей работе оценки точности геореференцирования данных архива Оператора КС ДЗЗ несколько лучше оценок, рассчитанных для L0-данных. Поэтому более детально проанализируем полученные результаты и причины различий:

- 1) штатные технологии Оператора КС ДЗЗ, при первичной каталогизации, предусматривают оценку и уточнение (не лучше 50 м) геопривязки данных съёмки КА, для которых имеются сбои бортовых навигационных систем, неудовлетворительные погодные условия и др. Поэтому приведённые результаты анализа L1В-данных КА «Ресурс-П» № 1 архива Оператора на порядок превосходят точность L0-данных;
- 2) применительно к данным КА «Ресурс-П» № 2, 3 различие на 8 м допустимо интерпретировать тем, что L1В-продукт сформирован с учётом результатов геометрической калибровки, для L0-данных калибровка не учитывается;
- 3) для данных «Канопус-В», во-первых, распределение точности геореференцирования исходных данных (см. *рис. 4*) имеет сильно пологую форму (среднеквадратичное отклонение составляет около 30 м), что обуславливает сильную изменчивость данного показателя в зависимости от выборки, используемой для оценки. Например, в работе (Федоткин и др., 2024) показано, что для снимков КА «Канопус-В» на территорию Республики Крым (более 20 маршрутов) средняя точность геопривязки L0-данных 43,2 м. Во-вторых, в настоящей работе приводится статистическая оценка точности одномоментных включений (шестёрки микрокадров), тогда как в работе (Федоткин и др., 2024) демонстрируется точность привязки всего маршрута.

Контроль качества информационных продуктов ДЗЗ

Контроль качества информационных продуктов ДЗЗ рассмотрим на примере обработки мозаичных покрытий и орторектифицированных продуктов сцен КА «Канопус-В», формируемых и предоставляемых потребителям в технологическом контуре Оператора. Для этого было разработано специальное программное обеспечение на основе методической схемы, приведённой на *рис. 1*.

Верификация качества мозаичных покрытий

Исследователи активно применяют данные КА Landsat в качестве опорных, например, (Васильев и др., 2020б; Кузнецов и др., 2015), для которых наблюдается высокая точность геопривязки (лучше пикселя по критерию SE90). Применительно к покрытию Landsat, сформированному в работе (Васильев и др., 2020б), и покрытию Planet была выполнена их относительная верификация с использованием разработанного программного обеспечения. Результаты контроля показаны на *рис. 6* (см. с. 45) для фрагмента покрытия Planet

на территорию стран Норвегии, Швеции, Финляндии и России. Цветом отмечено несоответствие покрытий: зелёным — менее 15 м; жёлтым — 15–30 м; красным — более 30 м. Дополнительный анализ в красных локациях показал расхождение используемых в покрытии снимков КА Landsat-8 и покрытия Planet (рис. 7). Данное обстоятельство может обуславливаться в том числе спецификой автоматической обработки данных Landsat — допускаются ошибки геопривязки более 1 пикселя для предоставляемых потребителям данных (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-levels-processing>). При этом серым/бесцветным цветом отмечены области (или блоки), где автоматический алгоритм не нашёл достаточного количества соответствий для определения надёжного сопоставления (и требуется участие оператора).

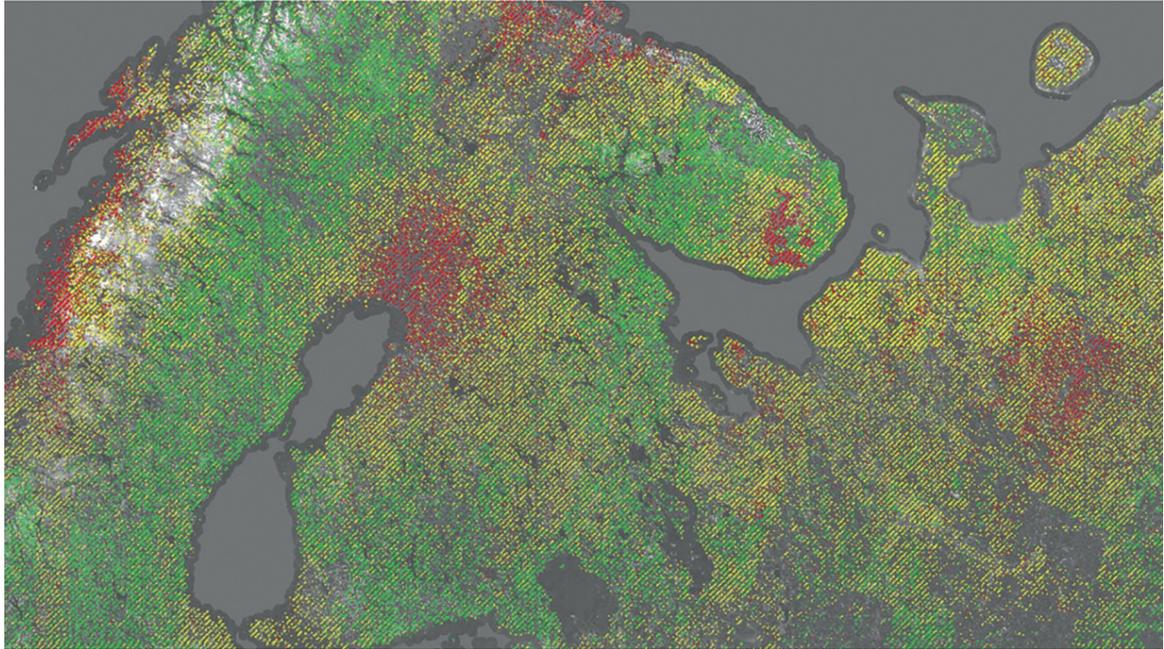


Рис. 6. Результат относительной верификации качества геопривязки покрытий Landsat и Planet на территорию стран Норвегии, Швеции, Финляндии и России. На покрытии Planet демонстрируются расхождения: менее 15 м (зелёный цвет), 15–30 м (жёлтый), более 30 м (красный)

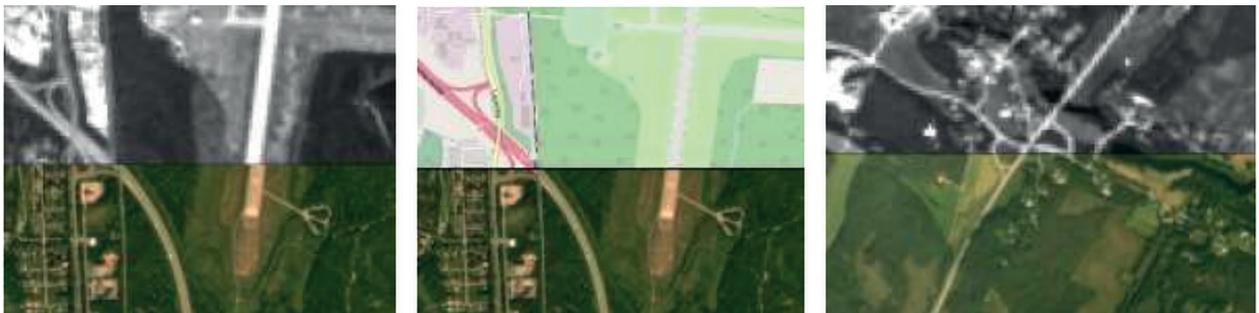


Рис. 7. Результат расхождения геопривязки сцены Landsat-8 (съёмка от 16.07.2018), используемой в мозаике, и покрытия Planet (снизу): для красной локации в районе северной части Ботнического залива (слева); для той же локации приведена карта OpenStreetMap (посередине); для зелёной локации в районе восточной части Ботнического залива (справа)

Оценка корректности результатов автоматической идентификации соответствий относительно «ручного» анализа проводилась для зелёной, жёлтой и красной локации. На рис. 8 (см. с. 46) показан пример оценки в красной локации — в районе северной части

Ботнического залива. Для анализируемого фрагмента рассчитывался средний вектор взаимного смещения между покрытиями: 1) на основе множества автоматически детектированных соответствий; 2) на основе вручную измеренных (векторы смещения в каждой опорной точке отмечены на скатерограмме *рис. 8*). Величина взаимного смещения составила немного более 2 пикселей (величины Landsat-покрытия), при этом различие рассчитанных средних смещений (для красных и синих точек) не превысило 0,2 пикселя. Среднеквадратическое отклонение смещений для скатерограммы на *рис. 8* составило не более 0,35 пикселя для автомата и не более 0,4 пикселя при ручном контроле. Для жёлтой и зелёной локации (было отобрано около 100 точек) наблюдалась такая же ситуация — корректная работа автомата относительно ручного контроля.

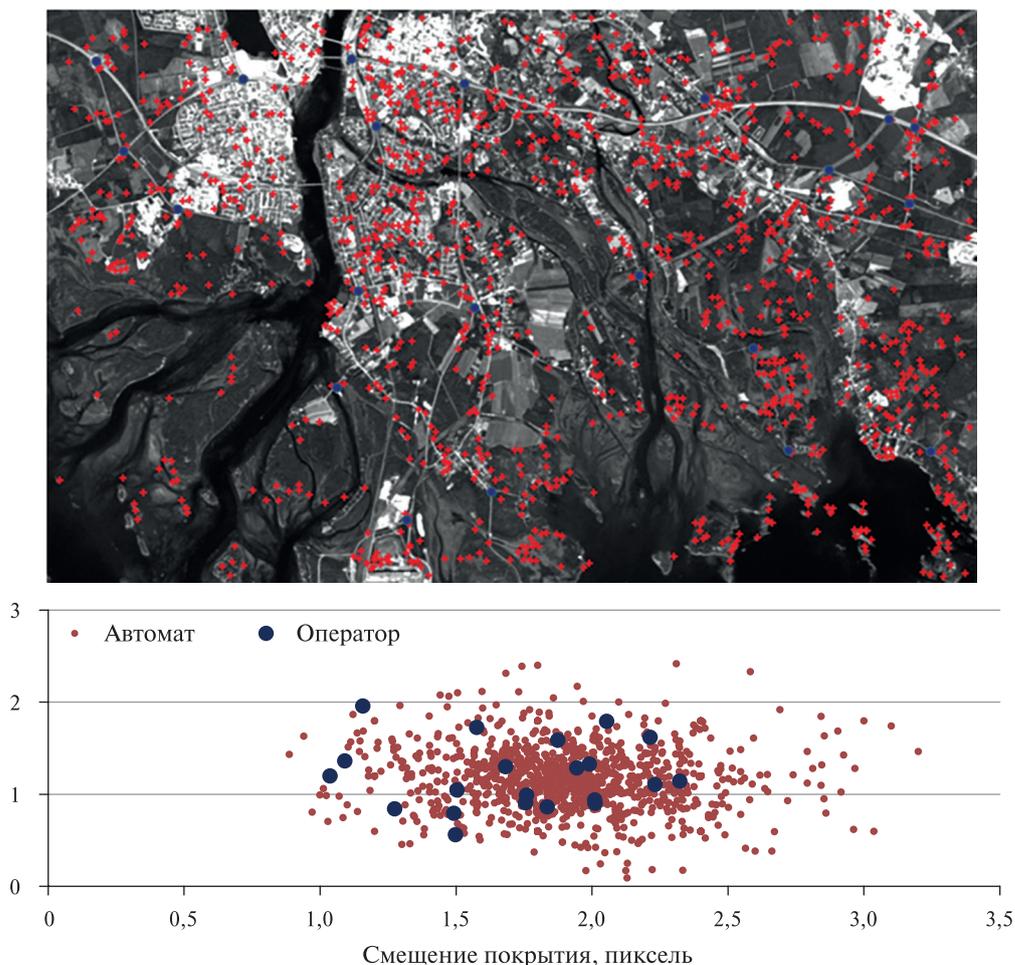


Рис. 8. Результат контроля автоматической идентификации соответствий в окрестности г. Торнио, Финляндия: фрагмент мозаики Landsat с отмеченными точками, найденными автоматически и оператором (*сверху*); скатерограмма смещений покрытия Planet относительно отобранных точек (в пиксельных величинах Landsat-покрытия) (*снизу*)

Верификация качества выходной продукции Оператора КС ДЗЗ

Верификация качества выходной продукции Оператора КС ДЗЗ проводилась на основе обработки орторектифицированных паншарп-продуктов КА «Канопус-В» № 3–6 и «Канопус-В-ИК», формируемых АПОИ (Федоткин и др., 2024) и предоставляемых потребителям в виде условных кадров (далее сцена) размером 20×20 км за период сентябрь–октябрь 2024 г. В общей сложности была выполнена верификация качества геопроецирования около 3000 сцен относительно покрытия Planet.

На *рис. 9* приведено распределение количества сцен (в %) в зависимости от абсолютной величины среднего сдвига для сцены. Полученные результаты демонстрируют абсолютную величину среднего смещения — 2,3 пикселя (или 4,83 м), критерий SE90 — не более 4 пикселей (не превышает 8,4 м). Расчёт среднеквадратической ошибки для рассмотренной выборки составляет не более 6 м и соответствует оценкам из статьи (Федоткин и др., 2024). Пример результатов верификации отдельной сцены показан на *рис. 10*: наблюдаются локации, для которых рассогласование привязки более 12,6 м (красный цвет), однако средний сдвиг составляет около 9 м (жёлтый цвет). При этом следует отметить, что также встречаются сцены, для которых рассчитанное среднее смещение более 20 м. Дополнительный анализ этих сцен показал ошибки геоереференцирования сцен АПОИ, доля таких сцен составляет около 1 %.

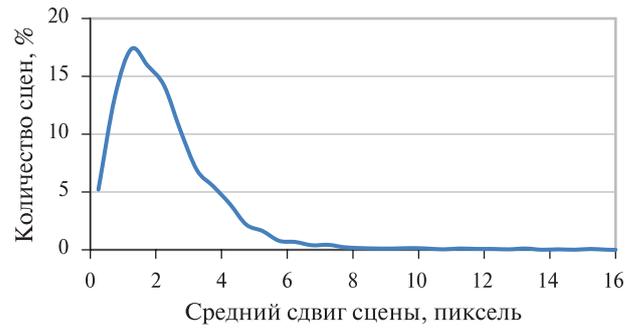


Рис. 9. Распределение количества верифицированных сцен КА «Канопус-В» (в %) в зависимости от величины среднего сдвига сцены

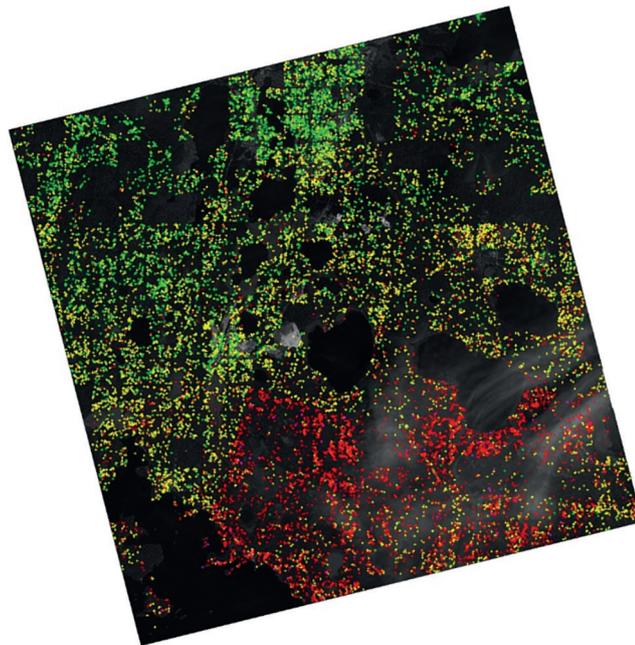


Рис. 10. Пример верификации качества выходной продукции Оператора КС ДЗЗ для сцены КА «Канопус-В» № 5 (в пикселях ПСС-изображения)

Заключение

Полученные в настоящей статье статистические оценки качества данных и информационных продуктов российских КС ДЗЗ на основе предложенного методического аппарата демонстрируют непротиворечивость и сопоставимость результатов верификации оценкам других исследователей. Более того, результаты оценки качества данных архива Оператора позволяют уточнить предельные границы, приводимые другими авторами для L0-данных, и далее сформулировать условия применимости данных архива для высокоуровневой обработки. Указанные обстоятельства определяют целесообразность внедрения предлагаемых подходов и решений в виде потоковых технологий оценки точности геоереференцирования данных и формируемых

информационных продуктов в технологическом контуре Оператора КС ДЗЗ. В свою очередь, активное развитие коммерческих и государственных группировок КА ДЗЗ (в том числе в рамках целевой программы «Сфера») обуславливает крайнюю необходимость специализации такого рода технологий в интересах обеспечения оперативного поступления качественной космической информации в Федеральный фонд данных ДЗЗ. Поэтому дополнительно ведётся адаптация технологии для контроля качества данных КА «Зоркий» и других перспективных КА ДЗЗ.

Дальнейшее развитие предложенных в настоящей статье решений целесообразно проводить в части обеспечения надёжного и устойчивого детектирования соответствий при обработке данных российских КА ДЗЗ с учётом различных углов Солнца и углов визирования КА, времени года, регионов наблюдения, а также спектральных характеристик съёмочных систем относительно опорного изображения. Применение общих подходов (в частности, демонстрируемых в данной работе) к детектированию соответствий показывает статистически удовлетворительный результат, однако для целого ряда снимков и фрагментов обработанных изображений наблюдаются пропуски (см. *рис. 6, 10*), что допускает расчёт смещённой оценки качества геореференцирования конкретного анализируемого образца.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Научного центра оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы» за помощь в подготовке данных и проведении экспериментов настоящего исследования: А. А. Артамонову, М. В. Мешкову, А. В. Крылову.

Литература

1. *Алексанин А. И., Краснопеев С. М., Морозов М. А., Фомин Е. В.* Совмещение изображений с российских спутников «Ресурс-П» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 18–28. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-18-28.
2. *Алексанин А. И., Морозов М. А., Фомин Е. В.* Автоматическое обновление бесшовного покрытия по данным спутников Канопус-В // Материалы 18-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2020. С. 425. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
3. *Бакланов А. И., Афонин А. Н., Блинов В. Д., Забиякин А. С.* КШМСА — комплекс широкозахватной мультиспектральной аппаратуры космического аппарата «Ресурс-П» // Вестн. Самарского ун-та. Аэрокосм. техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15. № 2. С. 22–29. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-22-29.
4. *Васильев А. И.* Калибровка съёмочной аппаратуры космического аппарата «Канопус-В» в процессе его эксплуатации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 203–214.
5. *Васильев А. И.* Разработка методов автоматического контроля точности геореференцирования данных КМСС КА «Метеор-М» № 2 // Ракетно-косм. приборостроение и информ. системы. 2023. Т. 10. Вып. 1. С. 31–41. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2022.10.1.31.41.
6. *Васильев А. И., Стремов А. С., Коваленко В. П.* Исследование данных комплекса широкозахватной мультиспектральной аппаратуры КА «Ресурс-П» для решения спектрометрических задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 36–51. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-36-51.
7. *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.
8. *Васильев А. И., Крылов А. В., Алексеевский А. С. и др.* (2020a) 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.
9. *Васильев А. И., Михеев А. А., Евлашкин М. А., Ольшевский Н. А.* (2020б) Технологии формирования и предоставления глобального опорного покрытия Земли на основе данных Landsat // Материалы 18-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2020. С. 432. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.

10. Васильев А. И., Стремев А. С., Коваленко В. П. и др. (2023а) Абсолютная радиометрическая калибровка и валидация данных КА «Аист 2Д» на основе съёмки Луны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 4. С. 30–41. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-30-41.
11. Васильев А. И., Крылов А. В., Михеев А. А. и др. (2023б) Технология создания бесшовного сплошного покрытия высокого пространственного разрешения на территорию России по данным группировки КА «Канопус-В» // Материалы 21-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2023. С. 71. DOI: 10.21046/21DZZconf-2023а.
12. ГОСТ Р 59480-2021. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Уровни обработки данных дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: Стандартинформ, 2021. 16 с.
13. Еремеев В. В., Зинина И. И., Кузнецов А. Е. и др. Технология потоковой обработки данных ДЗЗ высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 11–18. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-11-18.
14. Жуков Б. С., Кондратьева Т. В., Полянский И. В., Пермитина Л. И. Полетная радиометрическая кросс-калибровка комплекса многозональной спутниковой съёмки на КА «Метеор-М» № 1 по спектрорадиометру MODIS на КА Terra // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 123–137.
15. Кузнецов А. Е. Конвейерные технологии потоковой обработки данных от высоко детальных систем ДЗЗ // 4-я Международ. научно-техн. конф. «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли»: сб. тез. М., 2016. С. 148–150.
16. Кузнецов А. Е., Пошехонов В. И., Рыжиков А. С. Технология автоматического контроля точности геопривязки спутниковых изображений по опорным снимкам от КА Landsat-8 // Цифровая обработка сигналов. 2015. № 3. С. 37–42.
17. Луляя Е. А., Саворский В. П. Базовые продукты обработки данных ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 87–96.
18. Некрасов В. В. Технология обработки снимков КА «Канопус-В» и БКА в картографических целях // Сб. ст. по итогам Торжественного заседания, посвящённого 200-летию Российской военной топографической службы. М.: Изд-во МИИГАиК, 2012. С. 87–91.
19. 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.
20. Пошехонов В. И., Кузнецов А. Е., Егин М. М. Оценка точности аппроксимации строгой модели космической съёмки рациональными полиномами // Вестн. Рязанского гос. радиотехн. ун-та. 2023. № 83. С. 95–101. DOI: 10.21667/1995-4565-2023-83-95-101.
21. 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.
22. Barath D., Matas J., Noskova J. MAGSAC: Marginalizing Sample Consensus // Proc. IEEE/CVF Conf. “Computer Vision and Pattern Recognition” (CVPR). 2019. P. 10189–10197. DOI: 10.1109/CVPR.2019.01044.
23. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L. SURF: Speeded Up Robust Features // Computer Vision — ECCV 2006. ECCV 2006. Lecture Notes in Computer Science / eds. Leonardis A., Bischof H., Pinz A. V. 3951. Berlin; Heidelberg: Springer, 2006. P. 404–417. https://doi.org/10.1007/11744023_32.
24. Dusmanu M., Rocco I., Pajdla T. et al. D2-Net: A trainable CNN for joint detection and description of local features // 2019 IEEE/CVF Conf. “Computer Vision and Pattern Recognition” (CVPR). 2019. P. 8084–8093. DOI: 10.1109/CVPR.2019.00828.
25. Fischler M. A., Bolles R. C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography // Communications of the ACM. 1981. V. 24. Iss. 6. P. 381–395.
26. Grodecki J. IKONOS stereo feature extraction — RPC approach // Proc. 2001 ASPRS Annu. Conf. “Gateway to the New Millennium”. 2001. 7 p.
27. Harris C., Stephens M. A combined corner and edge detector // Alvey Vision Conf. 1988. P. 147–151. <http://dx.doi.org/10.5244/c.2.23>.
28. Huang Q., Guo X., Wang Y. et al. A survey of feature matching methods // IET Image Processing. 2024. V. 18. Iss. 6. P. 1385–1410. DOI: 10.1049/ipr2.13032.
29. Jiang X., Ma J., Xiao G. et al. A review of multimodal image matching: Methods and applications // Information Fusion. 2021. V. 73. P. 22–71. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2021.02.012>.
30. Lowe D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints // Intern. J. Computer Vision. 2004. V. 60. P. 91–110.

31. Markov A. N., Vasilyev A. I., Olshevskiy N. A. et al. Geoinformation service of the Russian EO-space systems information products // Proc. 2019 Big Data from Space (BiDS' 2019). EUR 29660 EN, Publications Office of the European Union, 2019. P. 281–284. DOI: 10.2760/848593.
32. Scheffler D., Hollstein A., Diedrich H. et al. AROSICS: An automated and robust open-source image co-registration software for multi-sensor satellite data // Remote Sensing. 2017. V. 9. Iss. 7. Article 676. 21 p. <https://doi.org/10.3390/rs9070676>.

Verification of georeferencing quality of data and information products of Russian remote sensing space systems

A. I. Vasilyev¹, S. M. Sokolov²

¹ *Research Center for Earth Operative Monitoring, Moscow 127490, Russia*
E-mail: a.vasilyev@ntsomz.ru

² *Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow 125047, Russia*
E-mail: sokolsm@keldysh.ru

The article considers the issues of georeferencing quality control for data and information products of Earth remote sensing. A methodological apparatus is proposed for monitoring satellite images of different photogrammetric processing levels using the approach based on comparison of such an image with a known well-georeferenced image for quality assessment. Algorithmic features are presented for assessing the georeferencing quality of archive data of the Operator of Space Systems for Earth Remote Sensing that contains mainly data not transformed into a cartographic projection. The results of the assessments are demonstrated for the images of the Kanopus-V and Resurs-P remote sensing space systems. For the Kanopus-V data (sensor resolution 2.1 m), the CE90 (Circular Error) criterion corresponds to a threshold of no more than 67 m. For the Resurs-P data (sensor resolution 0.7 m), the CE90 criterion corresponds to a threshold of no more than 30.8 m. The obtained assessments demonstrate an accuracy of the Operator's archive data better than the results provided by other researchers. The reasons for these differences are substantiated. In addition, the article considers quality assessment of mosaic coverings to verify the georeferencing and control the bands synthesis. For the output ortho-products of Kanopus-V, formed in the Operator's technological process, the evaluation results are demonstrated: a threshold value of no more than 8.4 m corresponds to the CE90 criterion. The conclusion notes the relevance of the solutions proposed in the article in view of creation of prospective multi-satellite constellations.

Keywords: Earth remote sensing, spacecraft, data processing, information product, quality control, georeferencing, Kanopus-V, Resurs-P, mosaic coverage, seamless continuous coverage

Accepted: 18.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-33-52

References

1. Alexanin A. I., Krasnopeev S. M., Morozov M. A., Fomin E. V., Superimposition of images from Russian Resource-P satellites, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 1, pp. 18–28 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-18-28.
2. Alexanin A. I., Morozov M. A., Fomin E. V., Automatic update of seamless coverage based on Kanopus-V satellite data, *Materialy 18-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 18th All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2020, p. 425 (in Russian), DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
3. Baklanov A. I., Afonin A. N., Blinov V. D., Zabiyaikin A. S., CWSME — complex of wide-swath multispectral equipment for the "Resource-P" spacecraft, *Vestnik of the Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2016, V. 15, No. 2, pp. 22–29 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-22-29.

4. Vasilyev A. I., Calibration of Kanopus-V satellite sensor during its operation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 1, pp. 203–214 (in Russian).
5. Vasilyev A. I., Development of the automatic control methods for the georeferencing data accuracy of the Meteor-M No. 2 Spacecraft Multispectral Imaging System, *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2023, V. 10, Iss. 1, pp. 31–41 (in Russian), DOI: 10.30894/issn2409-0239.2022.10.1.31.41.
6. Vasilyev A. I., Stremov A. S., Kovalenko V. P., Study of Resurs-P wide-swath multispectral equipment data applicability to spectrometric tasks, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 4, pp. 36–51 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-36-51.
7. Vasiliev 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, V. 16, No. 2, pp. 18–28 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-18-28.
8. Vasiliev A. I., Krylov A. V., Alexeevskiy A. S. et al. (2020a), Stream processing of data from 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"* (Proc. 18th All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2020, p. 431 (in Russian), DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
9. Vasil'ev A. I., Mikheev A. A., Evlashkin M. A., Ol'shevskii N. A. (2020b), Technologies for the formation and provision of global reference coverage of the Earth based on Landsat data, *Materialy 18-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 18th All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2020, p. 432 (in Russian), DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
10. Vasilyev A. I., Stremov A. S., Kovalenko V. P. et al. (2023a), Absolute radiometric calibration and validation of Aist-2D satellite data based on Moon imagery, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 4, pp. 30–41 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-30-41.
11. Vasil'ev A. I., Krylov A. V., Mikheev A. A. et al. (2023b), Technology for creating seamless continuous coverage of high spatial resolution on the territory of Russia based on data the Kanopus-V satellite constellation, *Materialy 21-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 21st Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2023, p. 71 (in Russian), DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a.
12. *GOST R 59480-2021. Dannye distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Urovni obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* (GOST R 59480-2021. Remote Sensing Data from Space. Levels of Processing Remote Sensing Data from Space), Moscow: Standartinform, 2021, 16 p. (in Russian).
13. Ereemeev V. V., Zinina I. I., Kuznetsov A. E. et al., Stream processing technology of high-resolution remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 1, pp. 11–18 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-11-18.
14. Zhukov B. S., Kondrat'eva T. V., Polyansky I. V., Permitina L. I., In-flight radiometric cross-calibration of Multispectral Satellite Imaging System on-board Meteor-M No. 1 relative spectroradiometer MODIS on-board Terra, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, V. 11, No. 2, pp. 123–137 (in Russian).
15. Kuznetsov A. E., Pipeline technologies for streaming data processing from high resolution remote sensing systems, *4-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya "Aktual'nye problemy sozdaniya kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli"* (4th Intern. Scientific and Technical Conf. "Actual problems of creating space systems for Earth remote sensing"), Book of abstr., Moscow, 2016, pp. 148–150.
16. Kuznetsov A. E., Poshehonov V. I., Ryzhikov A. S., Automatic georeference accuracy control technology based on reference pictures from the observation satellite Landsat-8, *Digital Signal Processing*, 2015, No. 3, pp. 37–42 (in Russian).
17. Loupian E. A., Savorskiy V. P., Basic products of Earth Remote Sensing Data Processing, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, V. 9, No. 2, pp. 87–96 (in Russian).
18. Nekrasov V. V., Technology for processing images from the Kanopus-V and BKA satellites for cartographic purposes, *Sbornik statei po itogam Torzhestvennogo zasedaniya posvyashchennogo 200-letiyu Rossiiskoi voennoi topograficheskoi sluzhby* (Proc. of the results of the Ceremonial meeting dedicated to the 200th anniversary of the Russian Military Topographic Service), Moscow: Izd. MIIGAiK, 2012, pp. 87–91 (in Russian).
19. 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, V. 17, No. 7, pp. 276–282 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-276-282.
20. Poshekhonov V. I., Kuznecov A. E., Egin M. M., Estimation of approximation accuracy for strict model of space imaging by rational polynomials, *Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2023, No. 83, pp. 95–101 (in Russian), DOI: 10.21667/1995-4565-2023-83-95-101.

21. 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 dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 3, pp. 9–30 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-9-30.
22. Barath D., Matas J., Neskova J., MAGSAC: Marginalizing Sample Consensus, *Proc. IEEE/CVF Conf. "Computer Vision and Pattern Recognition" (CVPR)*, 2019, pp. 10189–10197, DOI: 10.1109/CVPR.2019.01044.
23. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L., SURF: Speeded Up Robust Features, In: *Computer Vision — ECCV 2006. ECCV 2006, Lecture Notes in Computer Science*, Leonardis A., Bischof H., Pinz A. (eds.), V. 3951, Berlin; Heidelberg: Springer, 2006, pp. 404–417, https://doi.org/10.1007/11744023_32.
24. Dusmanu M., Rocco I., Pajdla T. et al., D2-Net: A trainable CNN for joint detection and description of local features, *2019 IEEE/CVF Conf. "Computer Vision and Pattern Recognition" (CVPR)*, 2019, P. 8084–8093, DOI: 10.1109/CVPR.2019.00828.
25. Fischler M. A., Bolles R. C., Random Sample Consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, *Communications of the ACM*, 1981, V. 24, Iss. 6, pp. 381–395.
26. Grodecki J., IKONOS stereo feature extraction — RPC approach, *Proc. 2001 ASPRS Annual Conf. "Gateway to the New Millennium"*, 2001, 7 p.
27. Harris C., Stephens M., A combined corner and edge detector, *Alvey Vision Conf.*, 1988, pp. 147–151, <http://dx.doi.org/10.5244/c.2.23>.
28. Huang Q., Guo X., Wang Y. et al., A survey of feature matching methods, *IET Image Processing*, 2024, V. 18, Iss. 6, pp. 1385–1410, DOI: 10.1049/ipr2.13032.
29. Jiang X., Ma J., Xiao G. et al., A review of multimodal image matching: Methods and applications, *Information Fusion*, 2021, V. 73, pp. 22–71, <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2021.02.012>.
30. Lowe D. G., Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *Intern. J. Computer Vision*, 2004, V. 60, pp. 91–110.
31. Markov A. N., Vasilyev A. I., Olshevskiy N. A. et al., Geoinformation service of the Russian EO-space systems information products, *Proc. 2019 Big Data from Space (BiDS'2019)*, EUR 29660 EN, Publications Office of the European Union, 2019, pp. 281–284, DOI: 10.2760/848593.
32. Scheffler D., Hollstein A., Diedrich H. et al., AROSICS: An automated and robust open-source image co-registration software for multi-sensor satellite data, *Remote Sensing*, 2017, V. 9, Iss. 7, Article 676, 21 p., <https://doi.org/10.3390/rs9070676>.