На правах рукописи



Егин Максим Михайлович

Математическое и алгоритмическое обеспечение обработки данных площадной съёмки от высокодетальных систем ДЗЗ

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань — 2026

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина» (РГРТУ) в НИИ обработки аэрокосмических изображений (НИИ «Фотон»).

Научный руководитель: **Кузнецов Алексей Евгеньевич**,
д-р техн. наук, профессор,
первый заместитель директора НИИ «Фотон» РГРТУ

Официальные оппоненты: **Селезнева Мария Сергеевна,**
д-р техн. наук, доцент,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва,
профессор кафедры «Технологии приборостроения»

Старков Александр Владимирович,
д-р техн. наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва,
и. о. заведующего кафедрой 604 «Системный анализ и управление»

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)**, г. Москва

Защита состоится **16 сентября 2026 г. в 12:00** на заседании диссертационного совета 24.2.375.01 при РГРТУ по адресу: **390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГРТУ и на сайте РГРТУ: `http://www.rsreu.ru`.

Автореферат разослан «____» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.375.01,
д-р техн. наук **Пруцков Александр Викторович**

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) широко используются для решения отраслевых тематических задач градостроительства, картографирования, природопользования, мониторинга чрезвычайных ситуаций и обеспечения безопасности. Современной тенденцией развития высокодетальных систем ДЗЗ является повышение пространственного разрешения и оперативности получения данных. Ввиду ограничений аппаратной базы высокодетальные оптические системы характеризуются узкой полосой захвата. Для организации оперативного наблюдения регионов интереса, превышающих полосу захвата, при проектировании современных космических аппаратов (КА) предусматривается режим площадной (широкозахватной) съёмки. В данном режиме спутник за счёт сложного углового движения на одном витке полёта выполняет съёмку региона интереса несколькими перекрывающимися изображениями. Особенностями режима являются динамически изменяемые измерения бортовой аппаратуры и отклонения КА от надира при съёмке каждого изображения. В наземных комплексах обработки информации ставится задача объединения материалов площадной съёмки в единый радиометрически и геометрически согласованный снимок — мозаичное изображение.

В связи с многообразием высокодетальных космических систем (КС) ДЗЗ целесообразна разработка унифицированных технологий и алгоритмов, что подтверждается направлением развития отечественных и зарубежных технологий обработки информации. Унификация технологий обработки позволяет минимизировать финансовые и трудовые расходы на проектирование, разработку и сопровождение составных частей наземного сегмента КС. Для этого при разработке математического и алгоритмического обеспечения используется модель камеры на основе коэффициентов рациональных полиномов (Rational Polynomial Coefficients, RPC), аппроксимирующая строгую физическую модель оптической системы.

С учётом растущих объёмов поступающей информации от спутниковых группировок перспективными считаются исследования, направленные на разработку полностью автоматических и оперативных технологий обработки материалов площадной съёмки. При условии своевременного выполнения процедур геометрической калибровки, получаемые выходные продукты объектовой съёмки обладают высокоточной геодезической привязкой без привлечения опорной информации. В рамках обработки материалов площадной съёмки необходимо обеспечить их совмещение с сохранением точностных характеристик отдельных снимков, получаемых в объектовом режиме. Таким образом, формирование мозаичных изображений по данным площадной съёмки от высокодетальных систем ДЗЗ представляет собой актуальную и практически значимую задачу.

Степень разработанности темы. Обработка данных ДЗЗ и формирование мозаичных изображений, в частности, отражены и глубоко исследованы в работах как отечественных, так и зарубежных исследователей. Значительный вклад

в развитие сплошных мозаичных покрытий внесли проекты Planet Basemaps, Copernicus, NASA Blue Marble, USGS Landsat, Банк базовых продуктов научного центра оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ), Геопортал Роскосмоса. Общие вопросы технологий обработки данных ДЗЗ и формирования мозаичных покрытий рассмотрены в работах специалистов Института космических исследований РАН, НИИ точных приборов, НЦ ОМЗ, РГРТУ, а также зарубежных исследователей P. Soille, C. Bielski, X. Li, Y. Ma и др. Однако в этих работах совмещение изображений земной поверхности строится на основе моделей геометрической обработки с привлечением опорной информации.

Важнейшими направлениями в ходе обработки данных площадной съёмки являются: разработка моделей и алгоритмов геометрической обработки изображений, обеспечивающих их высокоточное совмещение без использования опорной информации; синтез и оценка качества мозаичного снимка.

В части аспектов геометрической обработки вопросы построения строгой модели съёмки и калибровки оптических систем отечественных КА серии «Ресурс» рассмотрены Р. Н. Ахметовым, А. Е. Кузнецовым, В. И. Пошехоновым. Аппроксимация строгой модели RPC-моделью исследовалась C. Tao, Y. Hu, C. Fraser, H. Hanley, H. Pan, D. Greslou и др., при этом систематическая натурная оценка адекватности RPC-модели для отечественных КА высокого разрешения в литературе отсутствует. Для обеспечения высокоточного совмещения выполняется процедура блочного уравнивания (БУ), в результате которой на основе одноимённых точек (ОИТ) находятся поправки в модель съёмки. Надёжная идентификация ОИТ определяет решающий вклад в качество синтеза мозаичного снимка. Получение ОИТ сводится к поиску ключевых точек на объединяемых изображениях и их дальнейшему сопоставлению. В практике обработки данных ДЗЗ поиск ключевых точек осуществляется классическими методами — SIFT (D. G. Lowe), SURF (H. Bay), FAST (E. Rosten), BRIEF (M. Calonder); методы сопоставления и фильтрации разработаны M. Muja, M. A. Fischler, K. Lebeda и др., однако существующие алгоритмы в недостаточной степени учитывают специфику площадной съёмки. Найденные ОИТ являются входными данными алгоритмов БУ. Алгоритмы БУ с использованием RPC-модели разработаны J. Grodecki, G. Dial, развиты M. Tawfeik, Y. Dong, P. d'Angelo, X. Tong и др., вместе с тем вопросы обеспечения численной стабильности БУ групп снимков площадной съёмки в отсутствие опорной информации остаются недостаточно проработанными.

В части синтеза мозаичных изображений проблема проведения линий пореза решается такими способами, как модель узкого места (E. Fernandez), модель змеи (M. Kass, L. Wang, M. Kerschner), методы на основе алгоритма Дейкстры и динамического программирования (J. Davis, Y. Afek, M. Wang, A. Sudorgin), методы разреза графа (L. Li), метод морфологической композиции (P. Soille, C. Bielski), а также методы на основе нейронных сетей (S. Saito, S. Yuan). Однако применение указанных моделей, методов и подходов при значительно различающихся углах визирования ограничено. Вопросы оценки качества мозаичных

изображений регламентированы ГОСТ Р 70663-2023 и инструкцией ГКИНП (ГНТА)-02-036-02, отдельные критерии предложены H. Yin и R. Giudici, при этом единый подход к автоматической оценке качества линий пореза не представлен.

Таким образом, несмотря на значительный объём исследований, остаётся нерешённым ряд задач, связанных со спецификой обработки данных площадной съёмки от высокодетальных КА.

Целью диссертационного исследования является разработка новых технических решений, связанных с оперативным получением изображений земной поверхности расширенной полосы захвата от высокодетальных отечественных систем дистанционного зондирования Земли, функционирующих в режиме площадной съёмки. Для достижения поставленной цели в рамках исследования решаются следующие **задачи**:

1) разработка математических моделей и алгоритмов геометрической обработки материалов площадной съёмки, обеспечивающих высокую точность совмещения одноимённых объектов в области пересечения объединяемых изображений;

2) разработка алгоритмического обеспечения синтеза и оценки качества формируемых мозаичных снимков;

3) практическая реализация предложенных решений в виде специального программного обеспечения и применение его на натурных данных от высокодетальных КА.

Научная новизна работы заключается в разработке новых математических моделей и алгоритмов обработки, позволяющих комплексно решить актуальную задачу оперативного создания мозаичных изображений из материалов площадной съёмки на основе унифицированных функций геопривязки и оценки качества формируемых информационных продуктов. Научная новизна раскрывается в четырёх Положениях, выносимых на защиту.

Положения, выносимые на защиту.

1. Алгоритм отбраковки одноимённых точек на основе предобработки их областей с привлечением модели съёмки и гибридной интеллектуальной технологии классификации данных (совместное использование метода опорных векторов и окна Парзена) с автоматически размечаемой выборкой, который обеспечивает долю ложных соответствий не более $2\,\%$, что позволяет получить надёжное геометрическое совмещение изображений при блочном уравнивании.

2. Математическая модель блочного уравнивания с двухкомпонентной поправкой к RPC-уравнениям геопривязки и численно устойчивый за счёт виртуальных опорных точек алгоритм поиска её параметров, которые обеспечивают точность совмещения изображений площадной съёмки на уровне $1-2$ пикс. без ухудшения точности геокодирования итогового мозаичного снимка.

3. Модифицированный алгоритм формирования линии пореза при синтезе мозаичных изображений площадной съёмки, использующий комбинированную стоимостную функцию на основе морфологического градиента и маски рассогласований, формируемой свёрточной нейронной сетью по радиометрическим

признакам и картам диспаратности, который позволяет обнаруживать и обходить области геометрических рассогласований высотных объектов, снижая число их пересечений линией пореза в среднем на 80 %.

4. Критерии оценки качества мозаичных снимков из материалов площадной съёмки, а именно: критерий обнаружения дефектных границ на основе статистического и интеллектуального анализа показателей, используемый в алгоритме оценки качества линии пореза; критерий определения корректности геометрической обработки материалов площадной съёмки на основе сопоставления вероятностных статистических оценок одиночных и мозаичных снимков опорных полигонов.

Методы исследования. Результаты диссертационного исследования получены с использованием методов системного анализа, цифровой обработки изображений, математической статистики, оптимизации, фотограмметрии и искусственного интеллекта.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» в части: пункта 3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»; пункта 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»; пункта 5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта».

Практическая значимость состоит в том, что на базе предложенных решений разработаны модули для программных комплексов формирования информационных продуктов в составе наземных комплексов приёма, обработки и распространения данных Госкорпорации «Роскосмос» и центров специального назначения. Выполнена отработка на натурных и модельных данных от действующих и перспективных космических аппаратов соответственно.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов подтверждена корректным использованием математического аппарата, математическим и имитационным моделированием, практическими исследованиями на натурных и модельных данных от действующих и перспективных отечественных КА ДЗЗ высокого пространственного разрешения, сопоставлением альтернативных подходов.

Результаты диссертации использованы в опытно-конструкторских работах (ОКР), выполняемых НИИ «Фотон» РГРТУ, в рамках Федеральной космической программы и Гособоронзаказа по созданию математических и программных средств наземной обработки данных от КА серии «Ресурс» (ОКР № 14-20, № 2-22, № 9-21), серии «Аист» (ОКР № 3-20, № 13-23) и перспективного российско-белорусского космического аппарата (ОКР № 7-23).

Использование подтверждается Актами от ведущих предприятий ракетно-космической отрасли России: Ракетно-космического центра «Прогресс» (г. Самара) и Научно-производственной корпорации «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А. Г. Иосифьяна (г. Москва).

Апробация работы. Основные Положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях и форумах: на международных конференциях «Современные технологии в науке и образовании» (Рязань, 2017, 2018, 2021, 2025, 2026), «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли» (Москва, 2023, 2025), «В. Ф. Уткин — 100 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» (Рязань, 2023), «Intelligent Systems 2018» (Санкт-Петербург, 2018), «Прикладные исследования и технологии» (Москва, 2017), «Интеллектуальные и информационные системы» (Тула, 2017), «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве» (Воронеж, 2017); на всероссийских конференциях «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2017, 2019–2022, 2024, 2025), «Актуальные проблемы современной науки и производства» (Рязань, 2018), «Математические методы и информационные технологии управления в науке, образовании и правоохранительной сфере» (Рязань, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 33 работы, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК; 4 — в изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus; 22 — в тезисах докладов; зарегистрированы 2 программы для ЭВМ.

Личный вклад. Все основные Положения, выносимые на защиту, получены автором лично. В совместных публикациях автору принадлежат: разработка математических моделей, алгоритмов и методик, изложенных в Положениях 1–4; их программная реализация в составе программного комплекса обработки данных площадной съёмки; апробация на натурных данных от отечественных КА серии «Ресурс-П». Постановка задач исследования, обсуждение результатов и подготовка публикаций выполнены автором совместно с научным руководителем и соавторами по соответствующим направлениям работы.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 2 приложений. Полный объём диссертации составляет 185 страниц, включая 44 рисунка и 9 таблиц. Список литературы содержит 199 наименований.

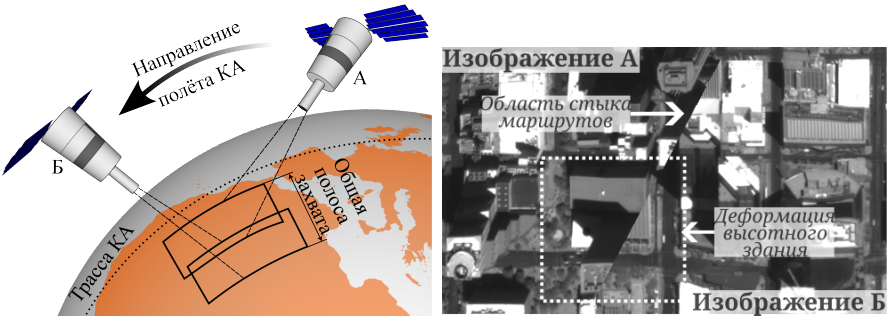
Основное содержание работы

Первая глава *посвящена системному анализу задачи обработки изображений земной поверхности, получаемых в высокодетальных системах ДЗЗ при площадной съёмке.*

Организация площадной съёмки в высокодетальных системах ДЗЗ. Приведены характеристики современных отечественных и зарубежных КА, поддерживающих режим площадной съёмки (рис. 1а), и описана технологическая схема обработки данных, включающая формирование продуктов уровней L0 – L3. Представлена унифицированная RPC-модель, аппроксимирующая строгую физическую модель изображения $I_k(m,n)$ и устанавливающая соответствие между растровыми m,n и геодезическими координатами B,L на заданной высоте H. Модель определяется как

$$m = P_k(B,L,H) = m_k^{(\mathrm{s})}\frac{\mathbf{c}_k^{\mathsf{T}}\mathbf{u}}{\mathbf{d}_k^{\mathsf{T}}\mathbf{u}} + m_k^{(\mathrm{o})},\ n = R_k(B,L,H) = n_k^{(\mathrm{s})}\frac{\mathbf{e}_k^{\mathsf{T}}\mathbf{u}}{\mathbf{f}_k^{\mathsf{T}}\mathbf{u}} + n_k^{(\mathrm{o})}, \quad (1)$$

где $\left(m_k^{(\mathrm{o})}, n_k^{(\mathrm{o})}\right)$ — растровые координаты центральной точки изображения $I_k\,(m,n)$; $m_k^{(\mathrm{s})}$, $n_k^{(\mathrm{s})}$ — нормализующие множители преобразования координат из диапазона $[-1;1]$ в растровые координаты изображения; $\mathbf{u}$ — вектор нормализованных геодезических координат; $\mathbf{c}_k$, $\mathbf{d}_k$, $\mathbf{e}_k$, $\mathbf{f}_k$ — коэффициенты RPC-модели изображения $I_k(m,n)$.



а) б)

Рис. 1 — Съёмка целевой территории одним КА при площадной съёмке: а) организация площадной съёмки; б) искажения в области линии стыка изображений, полученных при различных углах наблюдения

Анализ моделей формирования мозаичных снимков. Определён перечень направлений, исследование которых позволит повысить качество синтеза материалов площадной съёмки.

Первое направление заключается в повышении надёжности набора ОИТ, используемых в БУ. Установлено, что известные алгоритмы поиска ОИТ при значительном изменении угла визирования приводят к бракованным ОИТ. Показано, что использование пороговых алгоритмов отбраковки ОИТ недостаточно в условиях площадной съёмки.

Второе направление обусловлено численной нестабильностью БУ в условиях отсутствия опорной информации. Для обеспечения качественного совмещения материалов съёмки необходимо разработать математическую модель и алгоритм БУ, которые минимизируют невязки в ОИТ и сохраняют точностные

характеристики объединяемых изображений.

Третье направление в рамках синтеза мозаичных снимков заключается в разработке алгоритма проведения линии пореза, учитывающего особенности площадной съёмки. Показано, что остаточные геометрические искажения в области перекрытия изображений обусловлены двумя основными факторами: значительным изменением угла съёмки (рис. 1б) и искажением сюжета за время перенацеливания съёмочной аппаратуры (в результате движения объектов земной поверхности, изменения конфигурации теней и др.). Установлено, что применение известных алгоритмов проведения линии пореза при значительно различающихся углах визирования ограничено ввиду параллакса и окклюзий объектов.

Четвёртое направление основано на отсутствии единого подхода к автоматической оценке качества синтеза мозаичных изображений. Проанализированы нормативные документы, регламентирующие создание мозаичных изображений, а именно ГОСТ Р 70663-2023 и ГКИНП (ГНТА)-02-036-02. Определена необходимость разработки алгоритмов оценки качества, согласующихся с требованиями указанных документов.

Задачи диссертационного исследования определены на основе выполненного анализа и цели работы.

*Во **второй главе** рассматриваются модели и алгоритмы геометрической обработки материалов площадной съёмки, включающие аппроксимацию строгой модели унифицированной RPC-моделью, поиск одноимённых точек и блочное уравнивание.*

Представление строгой модели съёмки в унифицированном виде. В результате приёма и первичной обработки данных площадной съёмки выполняется аппроксимация строгой модели съёмки унифицированной моделью. На основе точности аппроксимации принимается решение о форме представления материалов съёмки: в системе координат виртуального сканирующего устройства (L1) или в системе координат картографической проекции после трансформирования на среднюю высоту (L2A). Расчёт коэффициентов $\mathbf{c}$ и $\mathbf{d}$ RPC-модели съёмки осуществляется итерационно решением системы уравнений невязок в кадровом направлении между строгой и RPC-моделью для регулярной сетки геодезических координат [1], а именно:

$$\mathbf{v} = \mathbf{WGC} - \mathbf{WM}, \tag{2}$$

где $\mathbf{v}$ — вектор взвешенных невязок в кадровом направлении; $\mathbf{W}$ — диагональная матрица весов; $\mathbf{G}$ — матрица плана, связывающая вектор неизвестных коэффициентов $\mathbf{C} = \begin{bmatrix}\mathbf{c} & \mathbf{d}\end{bmatrix}^{\mathsf{T}}$ с вектором наблюдений $\mathbf{M}$ в линеаризованной модели. Аналогично находятся коэффициенты $\mathbf{e}$ и $\mathbf{f}$ на основе системы уравнений невязок в строчном направлении.

На основе полученных коэффициентов рассчитываются статистические показатели точности аппроксимации, а именно: среднеквадратическая ошибка

вектора невязок,

$$\overline{\sigma}_k^{(m,n)} = \sqrt{\frac{1}{\mathcal{I}JT}\sum_{i,j,\tau}\left[\left(\Delta m_{i,j,\tau}\right)^2 + \left(\Delta n_{i,j,\tau}\right)^2\right]}; \quad (3)$$

максимальная суммарная невязка каждой точки сетки аппроксимации,

$$E_k = \sqrt{\max_{i,j,\tau}\left[\left(\Delta m_{i,j,\tau}\right)^2 + \left(\Delta n_{i,j,\tau}\right)^2\right]}, \quad (4)$$

где $\Delta m_{i,j,\tau}$ и $\Delta n_{i,j,\tau}$ — невязка в кадровом и строчном направлениях для точки (i,j), $i = \overline{1,\mathcal{I}}$, $j = \overline{1,J}$, сетки на высоте, соответствующей $\tau = \overline{1,T}$.

В результате расчёта ряда статистических показателей по натурным данным от отечественных КА серии «Ресурс» показано, что для снимков уровня обработки L1 от аппаратуры «Геотон» не обеспечивается высокоточная аппроксимация (значение $\overline{\sigma}_k^{(m,n)}$, усреднённое по числу анализируемых маршрутов, составляет $2{,}0344$ пикс.) строгой модели съёмки RPC-моделью вследствие высокочастотных геометрических искажений, вызванных угловым движением спутника и не описываемых RPC-моделью. Изображения уровня обработки L2A характеризуются более высокими точностными характеристиками (соответствующее значение составляет $0{,}0068$ пикс.). Для уменьшения числа передискретизаций, вызванных переходом к уровню обработки L2A, материалы площадной съёмки могут быть фрагментированы до перекрывающихся условных кадров, в пределах которых RPC-модель аппроксимирует строгую модель с достаточной точностью.

Алгоритм фильтрации одноимённых точек на основе предобработки их областей с использованием методов искусственного интеллекта. Для получения бесшовного изображения земной поверхности применяется процедура БУ, выполняемая на основе множества ОИТ. Точность совмещения напрямую зависит от качества этого множества. Для каждой пары пересекающихся снимков площадной съёмки выполняется поиск ключевых точек в области пересечения алгоритмом инвариантного к масштабу преобразования признаков (SIFT) с последующим сопоставлением быстрым приближённым методом ближайших соседей (FANN), в результате чего формируется предварительное множество ОИТ в виде пар растровых координат: $\mathcal{B} = \{(\tilde{m}_1, \tilde{n}_1), (\tilde{m}_2, \tilde{n}_2) \cdots\}$. Особенность полученного множества заключается в том, что ключевые точки сопоставлены методом FANN в пространстве признаков SIFT, и это сопоставление не учитывает взаимное расположение ОИТ в области пересечения снимков. В этой связи предложен алгоритм фильтрации одноимённых точек на основе предобработки их областей (**Положение 1**), позволяющий получить множество надёжно сопоставленных ключевых точек $\mathcal{B}'$ из множества $\mathcal{B}$.

На первом шаге алгоритма для каждой q-й пары ключевых точек формируется метка класса. Для этого по RPC-моделям и цифровой модели рельефа (ЦМР) рассчитывается длина вектора невязок $\Delta w_q = \sqrt{\Delta m_q^2 + \Delta n_q^2}$. Полученные значения соответствуют смеси распределений Райса (корректные сопоставления ключевых точек) и равномерного распределения (ошибочные сопоставления),

параметры которой оцениваются алгоритмом ожидания максимизации. Метка класса для q-й пары точек формируется по правилу:

$$\zeta_q = \begin{cases} +1, & \mathcal{P}(1|\Delta w_q) \geqslant \tau_1; \\ -1, & \mathcal{P}(1|\Delta w_q) \leqslant \tau_0; \\ 0, & \text{иначе}; \end{cases} \tag{5}$$

где $\mathcal{P}(1|\Delta w_q)$ — апостериорная вероятность принадлежности невязки Δw_q к распределению Райса; $\tau_1 = 0{,}8$, $\tau_0 = 0{,}2$ — эмпирические пороги.

На втором шаге для каждой q-й пары точек, у которой значение ζ_q не равно нулю, формируется признаковое описание в виде вектора $\mathbf{z}_q$. Признаки объединены в пять групп по своему физическому смыслу: различимость дескрипторов ($z_q^{(1)}$–$z_q^{(3)}$); схожесть дескрипторов ($z_q^{(4)}$, $z_q^{(5)}$); геометрическая согласованность масштаба и ориентации ($z_q^{(6)}$, $z_q^{(7)}$); пространственная согласованность в окрестности точки ($z_q^{(8)}$, $z_q^{(9)}$); признаки, основанные на геометрической модели съёмки ($z_q^{(10)}$–$z_q^{(12)}$), включая расстояние до эпиполярной кривой. Введённое описание привлекает модели съёмки и ЦМР, что позволяет учитывать особенности режима площадной съёмки.

На третьем шаге по полученному набору данных выполняется обучение классификатора на основе гибридной интеллектуальной технологии классификации данных (ГИТКД) [2; 6]. ГИТКД сочетает использование классификатора на основе SVM (KoSVM) и классификатора на основе метода окна Парзена (КоМОП) [7]. KoSVM осуществляет первичное разделение классов; для объектов в π-области вблизи разделяющей гиперплоскости применяется КоМОП с параметрами, определяемыми генетическим алгоритмом. Обученный классификатор применяется ко всему множеству $\mathcal{B}$, и если q-я пара точек, характеризуемая вектором признаков $\mathbf{z}_q$, классифицирована как корректное сопоставление, она добавляется во множество надёжно сопоставленных ключевых точек $\mathcal{B}' = \{(m_1, n_1), (m_2, n_2) \cdots\}$, которое является результатом выполнения алгоритма и используется в качестве ОИТ в процедуре БУ.

Вычислительная сложность алгоритма составляет $O(|\mathcal{B}|^2)$. Экспериментальная проверка показала долю ложных сопоставлений до $1{,}5\,\%$ и $2{,}1\,\%$ на натурных данных площадной съёмки при соответствующих значениях $16{,}3\,\%$ и $29{,}8\,\%$ известного подхода на основе алгоритма консенсуса на случайной выборке (RANSAC).

Математическая модель блочного уравнивания групп снимков с использованием RPC-модели. Выполнена постановка задачи БУ групп K снимков [3], геопривязанных по RPC-моделям. Невязки в строчном Δn и кадровом Δm направлениях определяются как разница между измеренными растровыми координатами и вычисленными по RPC-модели с поправкой. Задача сформулирована как минимизация взвешенной суммы квадратов невязок:

$$\sum_{k=1}^{K} \left[\sum_{l=1}^{Q_k} \frac{\Delta m_{k,l}^2 + \Delta n_{k,l}^2}{{\sigma_{k,l}^{(\mathrm{p})}}^2} \right] + \sum_{s=1}^{Q} \frac{\Delta h_s^2}{{\sigma^{(\hbar)}}^2} \;\to\; \min_{\boldsymbol{\Theta}}, \tag{6}$$

где $\boldsymbol{\Theta}$ — вектор неизвестных: уточнённые геодезические координаты ОИТ, параметры моделей поправок каждого k-го изображения в виде векторов $\boldsymbol{\rho}_k$ и $\boldsymbol{\kappa}_k$; Q, Q_k — общее число ОИТ и число ОИТ на пересечении изображений I_k и I_{k+1} соответственно; $\sigma^{(\mathrm{p})}_{k,l}$, $\sigma^{(\hbar)}$ — погрешности измерения растровых координат l-й ОИТ и значения высоты в ЦМР соответственно; Δh_s — невязка найденного значения высоты относительно ЦМР s-й ОИТ.

Исследованы полиномиальные модели поправок $\tilde{R}_k^{\mathrm{poly}}$, $\tilde{P}_k^{\mathrm{poly}}$ степеней $T = 0, \ldots, 4$ на материалах площадной съёмки. Показано, что модели высоких степеней приводят к искажениям сюжета за пределами областей точек. Анализ остаточных невязок после аффинной коррекции ($T = 1$) выявил их полиномиальную зависимость от номера строки (рис. 2).

Предложена двухкомпонентная модель поправок изображения $I_k(m,n)$:

$$\tilde{R}_k(m,n,\boldsymbol{\rho}_k) = \tilde{R}_k^{\mathrm{poly}}(m,n,\boldsymbol{\rho}_k) + \tilde{R}_k^{\mathrm{rs}}(n), \quad \tilde{P}_k(m,n,\boldsymbol{\kappa}_k) = \tilde{P}_k^{\mathrm{poly}}(m,n,\boldsymbol{\kappa}_k) + \tilde{P}_k^{\mathrm{rs}}(n), \quad (7)$$

где вторая компонента аппроксимирует остаточные невязки методом, аналогичным одномерному случаю метода резинового листа (rs) [3]. Экспериментальная проверка показала достижение среднеквадратического отклонения суммарных невязок $0{,}38$ м при соответствующем значении $1{,}04$ м для аффинной модели без ухудшения точности геопривязки.

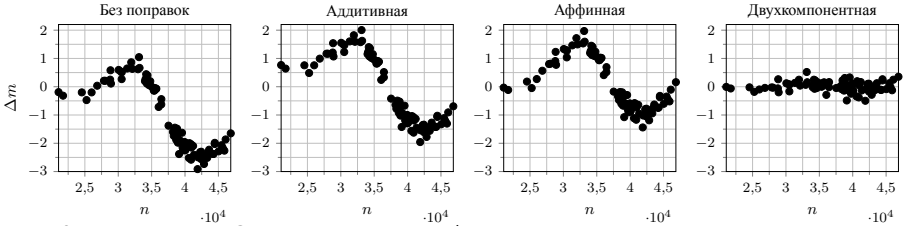


Рис. 2 — Невязки ОИТ в кадровом Δm направлении от номера строки n маршрута площадной съёмки после БУ без поправок, с аддитивной, аффинной и двухкомпонентной поправками

Алгоритмы оптимизации параметров модели блочного уравнивания. Проанализирована работа классического алгоритма БУ, основанного на итерационной линеаризации уравнений невязок в окрестности приближённого решения. На тестовом наборе данных без использования опорных точек выявлена численная нестабильность алгоритма: в отсутствие опорных точек матрица нормальных уравнений становится вырожденной, а геодезические координаты ОИТ не ограничены, вследствие чего значения суммы квадратов невязок возрастают с каждой итерацией, а найденные координаты являются неадекватными.

Для устранения выявленной нестабильности исследовано применение многоцелевого эволюционного алгоритма NSGA-II. Компоненты единой суммы квадратов невязок разделены на отдельные целевые функции в соответствии с физическим смыслом групп невязок: невязки растровых координат; невязки высот относительно ЦМР. Дополнительно введена регуляризирующая целевая функция, ограничивающая величину параметров модели поправок и

предотвращающая уход решения в физически недопустимую область. Применена модификация NSGA-II с самонастройкой параметров генетических операторов [8; 9]. Из полученного Парето-фронта выбирается решение, соответствующее точке перегиба, обеспечивающей наилучший баланс между конкурирующими целевыми функциями без явного задания весовых коэффициентов.

Экспериментальная проверка на натурных данных площадной съёмки подтвердила, что NSGA-II обеспечивает численно устойчивое решение задачи БУ. Вместе с тем квадратичный рост вычислительных затрат относительно числа неизвестных делает алгоритм неприемлемым для оперативной обработки при увеличении числа точек.

Разработан численно устойчивый алгоритм БУ (**Положение 2**), состоящий из трёх этапов.

На первом этапе по численно обращённым RPC-моделям и ЦМР вычисляются начальные оценки геодезических координат ОИТ; решается задача минимизации (6) относительно неизвестных геодезических координат ОИТ. Часть ОИТ преобразуется в виртуальные опорные точки (ВОТ), геодезические координаты которых фиксируются с заданной точностью, что обеспечивает ограничение области поиска решения.

На втором этапе задача поиска неизвестных параметров уравнивания выполняется минимизацией следующей суммы квадратов невязок ОИТ и ВОТ

$$\sum_{k=1}^{K}\left[\sum_{l=1}^{J_k+Q'_k}\frac{\Delta m_{k,l}^2+\Delta n_{k,l}^2}{{\sigma_{k,l}^{(\mathrm{p})}}^2}+\sum_{j=1}^{J_k}\left[\frac{\Delta x_{k,j}^2+\Delta y_{k,j}^2}{{\sigma_{k,j}^{(\mathrm{пл})}}^2}+\frac{\Delta H_{k,j}^2}{{\sigma_{k,j}^{(\hbar)}}^2}\right]\right]+\sum_{s=1}^{Q'}\frac{\Delta h_s^2}{{\sigma^{(\hbar)}}^2}\to\min_{\boldsymbol{\Theta}},\tag{8}$$

где J_k — число ВОТ на изображении I_k; Q', Q'_k — общее число ОИТ и число ОИТ на пересечении изображений I_k и I_{k+1} после формирования ВОТ; $\Delta x_{k,j}$, $\Delta y_{k,j}$ и $\sigma_{k,j}^{(\mathrm{пл})}$ — невязки плановых координат и погрешность измерения j-й ВОТ по численно обращённой RPC-модели изображения I_k; $\Delta H_{k,j}$ — невязка высоты j-й ВОТ. На основе найденных параметров модели поправок оцениваются статистические характеристики точности совмещения.

На третьем этапе, если точность совмещения превышает допустимый порог, к скорректированной модели съёмки применяется двухкомпонентная поправка остаточных невязок.

Использование предлагаемого алгоритма позволяет в условиях отсутствия опорной информации обеспечить стабильное субпиксельное совмещение материалов площадной съёмки за счёт: 1) формирования ВОТ; 2) применения разработанной двухкомпонентной поправки устранения остаточных невязок.

Третья глава *посвящена задаче синтеза и оценки качества мозаичных изображений, формируемых по данным площадной съёмки, на основе моделей и алгоритмов геометрической обработки, предложенных в главе 2.*

Синтез непрерывного мозаичного снимка. Рассмотрена процедура синтеза мозаичного снимка (информационного продукта уровня обработки L3) по данным площадной съёмки (рис. 3). Входными данными являются K изображений земной поверхности, сопровождаемых RPC-моделями съёмки; показано, что по точностным характеристикам использование уровня обработки L2A предпочтительно по сравнению с уровнем L1.



Рис. 3 — Технологическая схема синтеза непрерывного мозаичного снимка по данным площадной съёмки

Синтез мозаичного снимка включает следующие этапы. На первом этапе выполняется поиск ОИТ: определяется расширенная область поиска, выполняется предварительное сопоставление пар ключевых точек и применяется разработанный алгоритм фильтрации одноимённых точек для формирования множества надёжно идентифицированных соответствий. На втором этапе выполняется БУ с использованием разработанного численно устойчивого алгоритма и ЦМР, в результате которого формируются уточнённые модели геопривязки каждого изображения:

$$\begin{aligned} m' &= P_k(B,L,H), \quad n' = R_k(B,L,H), \\ m &= P'_k(B,L,H) = m' + \tilde{P}_k(m',n',\boldsymbol{\kappa}_k), \\ n &= R'_k(B,L,H) = n' + \tilde{R}_k(m',n',\boldsymbol{\rho}_k). \end{aligned} \tag{9}$$

Для каждой пары пересекающихся изображений выполняется построение карт диспаратности в системе координат эпиполярно выпрямленных изображений. Привлечение карт диспаратности позволяет перейти от анализа радиометрических различий фрагментов мозаики к учёту трёхмерной геометрии наблюдаемой сцены при проведении линии пореза. Необходимость такого перехода обусловлена тем, что при площадной съёмке проекции высотных объектов на пересекающихся изображениях пространственно смещены, а известные алгоритмы построения линии пореза, основанные на яркостных критериях, не способны обнаружить подобные геометрические рассогласования.

На этапе ортотрансформирования исходные изображения с обновлёнными моделями геопривязки преобразуются в картографическую проекцию с единым размером пикселя и согласованными параметрами геопривязки, исключающими дополнительную яркостную интерполяцию при объединении. В результате

проведения линии пореза синтезируется единое непрерывное мозаичное изображение, маскирующее остаточные рассогласования в области наложения совмещаемых снимков.

Алгоритм проведения линии пореза мозаичных изображений. Поставлена задача проведения линии пореза мозаичного изображения, формируемого из ортотрансформированных фрагментов площадной съёмки. Мозаичное изображение определяется как дискретная функция яркости, формируемая по исходным снимкам с учётом бинарных масок фрагментов; линия пореза задаётся соответствующими масками. Для снижения визуального эффекта остаточных искажений в области линии пореза используется полупрозрачный переход на основе нормализованного евклидова расстояния до границы фрагмента. В общем случае проведение линии пореза сводится к вычислению стоимостной функции и выполнению маркированной сегментации.

Известные стоимостные функции оперируют исключительно радиометрической информацией, что не позволяет обнаруживать геометрические рассогласования проекций высотных объектов, характерные для площадной съёмки.

Предложен модифицированный алгоритм проведения линии пореза (**Положение 3**) [10; 12—14]. Ключевым отличием от алгоритма порядконезависимого создания мозаичных изображений, предложенного C. Bielski и P. Soille, является комбинированная стоимостная функция:

$$\mathcal{F}(x,y) = G(x,y) \cdot \big(1 + \alpha \cdot \delta_{\mathcal{C}}(x,y)\big), \tag{10}$$

где $G(x,y)$ — поэлементный минимум морфологического градиента фрагментов; $\delta_{\mathcal{C}}(x,y)$ — обратно нормализованное расстояние до маски рассогласований $\mathcal{C}(x,y)$; α — весовой коэффициент. Маска $\mathcal{C}(x,y)$ формируется свёрточной нейронной сетью архитектуры U-Net по четырёхканальному входу: два канала яркости фрагментов и два канала карты диспаратности (D_x, D_y). Множитель $(1 + \alpha \cdot \delta_{\mathcal{C}})$ формирует явный водораздел, направляющий линию пореза в обход высотных объектов и зон изменения сюжета.

Экспериментальная апробация на натурных высокодетальных снимках территорий с различным характером застройки показала, что алгоритм обеспечивает обход областей геометрических рассогласований (здания, эстакады) и радиометрических изменений (облачность), что соответствует требованиям нормативных документов.

Алгоритм оценки качества линии пореза мозаичных изображений. Дефект линии пореза проявляется в виде перепадов яркости, аномальных с точки зрения сюжета. Известные детекторы границ неэффективны, поскольку выделяют преимущественно естественные границы объектов. Введена мера насыщения границы на основе асимметричных фильтров по четырём направлениям ($0°$, $45°$, $90°$, $-45°$) с вектором признаков $\boldsymbol{\psi}$ из 12 компонент.

Разработан четырёхэтапный алгоритм оценки качества линии пореза (**Положение 4**) [4]: 1) формирование множества S координат линии пореза; 2) сбор статистики по двум критериям — индексу структурного сходства SSIM (z_j) и мере насыщения границы ($\boldsymbol{\psi}$) [15]; 3) обработка статистики — порог

SSIM определяется как внутренняя нижняя граница межквартильного размаха $\mathcal{L}(\mathbf{z}) = \mathcal{Q}_1 - 1{,}5(\mathcal{Q}_3 - \mathcal{Q}_1)$, для критерия насыщения обучается одноклассовый SVM-классификатор (OC-SVM); 4) синтез растровой бинарной маски дефектов $Q^T(x_j,y_j)$ и вычисление интегрального критерия качества Υ:

$$\Upsilon = \frac{\sum_{j=1}^{|S|}[Q^T(x_j,y_j) = 0]}{|S|}, \tag{11}$$

где $|S|$ — мощность множества S; $[\cdot]$ — скобка Айверсона.

Экспериментальная проверка на данных от действующих высокодетальных КА подтвердила, что совместное применение критериев обеспечивает автоматическую оценку качества, согласующуюся с визуальной оценкой оператора и нормативными документами формирования мозаичных покрытий.

Методика оценки точности геопривязки мозаичных снимков на основе статистических показателей. Оценка точности координатной привязки материалов съёмки является одной из основных характеристик космической системы ДЗЗ. Существующий подход на основе среднеквадратического отклонения координатных рассогласований в опорных точках не обеспечивает вероятностной интерпретации оценки, ограничен одиночными снимками и не позволяет характеризовать точностные показатели системы в целом. Критерий CE90, основанный на предположении о нормальном распределении ошибок с равными дисперсиями и нулевыми средними, на практике не всегда применим ввиду несоблюдения указанных условий.

Разработана методика оценки точности координатной привязки мозаичных изображений [5] (**Положение 4**), предусматривающая последовательное выполнение следующих этапов: 1) вычисление координатных рассогласований в опорных точках; 2) отбраковку грубых ошибок по критерию Граббса; 3) оценку уровня внутрикадровых искажений по среднеквадратическим отклонениям ошибок в пределах каждого снимка; 4) формирование обобщённых оценок математических ожиданий и среднеквадратических отклонений по группе разновременных изображений (не менее 15); 5) проверку статистических гипотез о равенстве нулю математических ожиданий (критерий Стьюдента) и равенстве дисперсий (критерий Фишера); 6) вычисление итоговой вероятностной оценки — CE90 при выполнении условий параметрической модели либо непараметрического процентиля P90 в общем случае.

Применительно к мозаичным изображениям площадной съёмки разработанный аппарат применяется независимо к двум наборам данных: совокупности одиночных снимков уровня L2B, входящих в состав мозаики, и совокупности мозаичных изображений уровня L3. Это позволяет получить две сопоставимые вероятностные оценки — $P90_O$ для одиночных снимков и $P90_M$ для мозаичных изображений. Корректность геометрической обработки, включая блочное уравнивание по RPC-модели с двухкомпонентной моделью поправок без привлечения опорной информации, подтверждается выполнением условия $P90_M \leqslant P90_O$, означающего, что синтез мозаики не приводит к ухудшению точности геопривязки по сравнению с исходными одиночными снимками.

*В **четвёртой главе** представлены результаты практической реализации разработанного математического и алгоритмического обеспечения в виде программного комплекса (ПК), а также экспериментальной апробации предложенных решений на натурных данных.*

Структура программного комплекса обработки. Разработанное математическое и алгоритмическое обеспечение реализовано в ПК обработки данных площадной съёмки на базе платформы «Er-Set», предназначенной для разработки высокопроизводительного специализированного программного обеспечения обработки данных систем ДЗЗ. Представлена структура ПК и схема модульной обработки данных.

Входными данными для программного комплекса является задание на обработку, содержащее перечень маршрутов площадной съёмки уровня обработки L1. Обработка выполняется в соответствии со схемой синтеза мозаичных снимков и включает следующие декомпозируемые операции, допускающие многосерверное исполнение: аппроксимация RPC-модели; поиск одноимённых точек; БУ [11]; построение карт диспаратности; ортотрансформирование маршрутов; проведение линии пореза [10; 16]. Промежуточные результаты каждого этапа сохраняются в обменную директорию. Выходным продуктом является геометрически и радиометрически бесшовное мозаичное изображение в формате GeoTIFF, сопровождаемое файлом метаданных. ПК функционирует в двух режимах: автоматическом и автоматизированном. В автоматическом режиме формирование выходного продукта осуществляется без участия оператора; в автоматизированном — с возможностью контроля и коррекции выполняемых операций.

Инструменты выполнения и контроля геометрической обработки. Автоматизированный режим предоставляет оператору инструментарий контроля корректности процедур геометрической обработки, включающий: ручное измерение опорных и одноимённых точек; выполнение БУ с выбором модели поправок и визуализацией невязок; оценку точности геопривязки по исходной и скорректированной моделям отдельных маршрутов.

Средства автоматизированной оценки качества мозаичных изображений. Описаны инструментальные средства, обеспечивающие: ручную коррекцию линии пореза; анализ дефектов линии пореза в соответствии с разработанным алгоритмом; оценку точности геопривязки мозаичного изображения с формированием отчётов по разработанной методике. Описаны состав инструментальных средств и порядок работы оператора.

Результаты экспериментальной апробации. Апробация выполнена на натурных данных от двух КА серии «Ресурс-П» (две пары маршрутов), на 20 парах маршрутов, смоделированных на основе материалов стереосъёмки, и на модельных данных перспективных КА. Представлены результаты выполнения каждого этапа технологии формирования мозаичных изображений и получены количественные оценки качества синтеза. Показано, что применение разработанных алгоритмов обеспечивает формирование бесшовных мозаичных изображений с

субпиксельной точностью совмещения маршрутов, при этом точность геопривязки мозаичных изображений не уступает соответствующим показателям входящих в их состав одиночных снимков.

Заключение

1. В диссертационной работе получены новые научно обоснованные технические решения, обеспечивающие оперативное получение высокодетальных изображений земной поверхности с увеличенной полосой захвата от космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, функционирующих в режиме площадной съёмки. В совокупности предложенные решения обеспечивают комплексное решение задачи оперативного формирования мозаичных снимков и единый технологический цикл обработки данных площадной съёмки.

2. Разработаны математические модели и алгоритмы геометрической обработки материалов площадной съёмки. Предложен алгоритм расчёта коэффициентов унифицированной RPC-модели съёмки со статистическими показателями оценки точности аппроксимации строгой модели. Обоснован алгоритм отбраковки одноимённых точек на основе гибридной интеллектуальной технологии классификации данных, обеспечивающий фильтрацию одноимённых точек перед блочным уравниванием. Получены математическая модель и численно устойчивый алгоритм блочного уравнивания с двухкомпонентной поправкой к RPC-модели в отсутствие опорной информации, обеспечивающие высокоточное совмещение объединяемых изображений.

3. Разработано алгоритмическое обеспечение синтеза и оценки качества мозаичных снимков, включающее: модифицированный алгоритм проведения линии пореза, использующий радиометрические и геометрические свойства объединяемых изображений для оперативного обхода высотных зданий и объектов; алгоритм оценки качества линии пореза, выявляющий неестественные границы на мозаичном изображении. Предложена методика оценки точности определения координат объектов на мозаичных снимках с применением статистических показателей, подтверждающая сохранение измерительных свойств исходных изображений.

4. Предложенные решения реализованы в виде специального программного обеспечения, апробированы на натурных данных от космических аппаратов серии «Ресурс-П» и внедрены в наземные комплексы приёма, обработки и распространения данных предприятий ракетно-космической отрасли. По сравнению с известными подходами разработанная технология обеспечивает автоматическое формирование мозаичных снимков в отсутствие опорной информации. Достигается унификация обработки данных от разных видов отечественных космических аппаратов.

Основные публикации автора по теме диссертации

Из 33 работ с участием соискателя, приведенных в диссертации, ниже представлены основные работы, которые наиболее полно раскрывают **Положения**, вынесенные на защиту.

В изданиях из списка ВАК РФ

1. *Пошехонов*, *В. И.* Оценка точности аппроксимации строгой модели космической съёмки рациональными полиномами [Текст] / В. И. Пошехонов, А. Е. Кузнецов, **М. М. Егин** // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. — 2023. — № 83. — С. 95—101. — (ВАК).

2. *Демидова*, *Л. А.* Гибридная интеллектуальная технология классификации данных [Текст] / Л. А. Демидова, **М. М. Егин** // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. — 2018. — 1 (41). — С. 56—68. — (ВАК).

3. Геометрический синтез мозаичных снимков с использованием рациональных полиномов [Текст] / **М. М. Егин** [и др.] // Цифровая обработка сигналов. — 2025. — № 3. — С. 10—16. — (ВАК).

4. Алгоритм оценки качества совмещения мозаичных изображений земной поверхности [Текст] / **М. М. Егин** [и др.] // Цифровая обработка сигналов. — 2026. — № 1. — С. 32—37. — (ВАК).

5. Методическое обеспечение оценки точности координатной привязки изображений земной поверхности в системах ДЗЗ высокого пространственного разрешения [Текст] / **М. М. Егин** [и др.] // Цифровая обработка сигналов. — 2025. — № 3. — С. 95—97. — (ВАК).

В изданиях, входящих в международные базы цитирования

6. *Demidova*, *L.* Data classification based on the hybrid intellectual technology [Text] / L. Demidova, **M. Egin** // ITM Web of Conferences / ed. by E. Nikulchev, G. Bubnov. — 2018. — Vol. 18. — P. 1—5. — (WoS).

7. *Demidova*, *L.* Improving the accuracy of the SVM classification using the Parzen classifier [Text] / L. Demidova, **M. Egin** // 2018 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). — IEEE, 06/2018. — P. 1—4. — (Scopus, WoS).

8. *Demidova*, *L.* Novel modifications of the multi-objective genetic algorithm for SVM classifier [Text] / L. Demidova, **M. Egin**, R. Tishkin // International Journal on Information Technologies and Security. — 2018. — Vol. 10, no. 2. — P. 89—100. — (WoS).

9. *Demidova*, *L. A.* A Self-tuning Multiobjective Genetic Algorithm with Application in the SVM Classification [Text] / L. A. Demidova, **M. M. Egin**, R. V. Tishkin // Procedia Computer Science. — 2019. — Vol. 150. — P. 503—510. — (Scopus).

Зарегистрированные программы для ЭВМ

10. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ*. Программа автоматического формирования линий пореза мозаичного ортофотоплана [Текст] / **М. М. Егин**, А. Е. Кузнецов, О. А. Пресняков ; ФГБОУ ВО «РГРТУ» (RU). — № 2025668197 ; заявл. 17.06.2025 ; опубл. 11.07.2025, 2025667176 (Рос. Федерация).

11. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ*. Программа двухэтапного блочного уравнивания изображений ДЗЗ, привязанных по RPC-модели [Текст] / **М. М. Егин**, А. Е. Кузнецов, В. И. Пошехонов ; ФГБОУ ВО «РГРТУ» (RU). — № 2025668405 ; заявл. 17.06.2025 ; опубл. 15.07.2025, 2025667139 (Рос. Федерация).

В сборниках трудов конференций

12. *Егин*, *М. М.* Разработка алгоритма определения линий стыковки фрагментов мозаичных изображений земной поверхности [Текст] / **М. М. Егин** // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. — 2019. — С. 268—269.

13. Технология бесшовного объединения данных площадной съёмки [Текст] / **М. М. Егин** [и др.] // Материалы Одиннадцатой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». — 2023. — С. 124—126.

14. *Пресняков*, *О. А.* Анализ водораздельного алгоритма формирования линий стыка мозаичного ортофотоплана [Текст] / О. А. Пресняков, **М. М. Егин** // 8-я международная научно-техническая конференция «В.Ф. Уткин — 100 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика»: Мат. докл. — 2023. — С. 340—341.

15. *Егин*, *М. М.* Алгоритм оценки качества линий пореза мозаичных изображений с использованием алгоритмов машинного обучения [Текст] / **М. М. Егин**, П. А. Князьков // Новые информационные технологии в научных исследованиях НИТ-2025: материалы XXX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. — 2025. — С. 128—129.

16. *Егин*, *М. М.* Программные средства создания и отображения мозаичных изображений земной поверхности [Текст] / **М. М. Егин**, О. А. Пресняков // Новые информационные технологии в научных исследованиях НИТ-2021: материалы XXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. — 2021. — С. 226—227.

17. *Егин*, *М. М.* Алгоритм получения мозаичных изображений, с использованием RPC-полиномов [Текст] / **М. М. Егин** // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXV Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. — 2020. — С. 247.

Егин Максим Михайлович

Математическое и алгоритмическое обеспечение обработки данных площадной съёмки от высокодетальных систем ДЗЗ

Автореф. дисс. на соискание учёной степени канд. техн. наук

Бумага офисная. Печать цифровая.
Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина